



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY
A BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**STANOVENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
KERAMICKÉ PĚNOVÉ STRUKTURY S OTEVŘENOU
PÓROVITOSTÍ METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ**

DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF OPEN CERAMIC FOAM STRUCTURE USING
FINITE ELEMENT METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Milan Barančík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skalka, Ph.D.

BRNO 2017



Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Milan Barančík**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: **Ing. Petr Skalka, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí metodou konečných prvků

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysoce porézní keramické materiály tvoří jedinečnou skupinu materiálů s nízkou relativní hmotností, kde objemový podíl pórů přesahuje až 80 %. V posledních letech výrazně vzrostl zájem o výrobu těchto materiálů, přičemž tento zájem je hlavně spojován s jejich vlastnostmi, jako např. poměr hmotnosti a tuhosti, vysoká permeabilita, nízká relativní hmotnost, nízká tepelná roztažnost, velká povrchová plocha vůči objemu, vysoká tepelná izolační schopnost, značná schopnost absorbovat energii, atd. Hlavní nevýhodou těchto materiálů je vysoká křehkost často umocněná přítomností značného množství defektů. Diplomová práce je zaměřena na stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury využitím metody konečných prvků. Stanovení těchto vlastností je nezbytné pro spolehlivý konstrukční návrh součástí, vyrobených z keramických porézních materiálů, v širokém spektru průmyslových aplikací. Znalost těchto charakteristik je rovněž důležitá pro vývoj keramických materiálů odolnějších vůči vnějšímu zatížení.

Cíle diplomové práce:

1. Provedení rešeršní studie související s řešenou problematikou
2. Vytvoření výpočtového modelu keramické pěnové struktury
3. Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury
4. Analýza dosažených výsledků a učinění závěrů

Seznam literatury:

Gibson, Lorna J., Ashby, Michael F. (1997): Cellular Solids - Structure and properties, Cambridge University Press

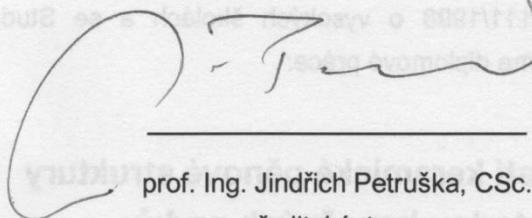
Carter, C. Barry., Norton, M. Grant. (2013): Ceramic Materials - Science and Engineering, Springer Science

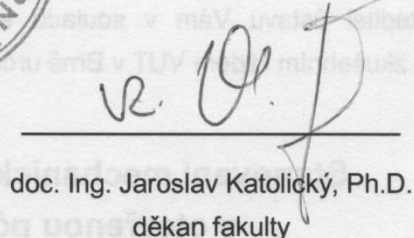
Nemat-Nasser, Sia., Hori, Muneo. (1998): Micromechanics - overall properties of heterogeneous materials

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016




prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu výpočtového modelu keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí a stanovení mechanických vlastností této struktury pomocí výpočtového modelování. Při tvorbě modelu geometrie pěnové struktury bylo využito geometrie Kelvinovy buňky. Model geometrie pěnové struktury byl diskretizován objemovými prvky, prutovými prvky a kombinací tuhého a poddajného prutového prvku. Elastické konstanty pěnové struktury byly stanoveny na základě dvou typů namáhání. Při namáhání tahem/tlakem byl určen Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo a při namáhání smykem byl určen modul pružnosti ve smyku. V práci byla provedena analýza závislosti mechanických vlastností pěnové struktury na poměru průměru trámečku D a jeho délky L . V případě modifikované diskretizace modelu geometrie pěnové struktury prutovými prvky bylo vůči diskretizaci objemovými prvky docíleno shody u Youngova modulu pružnosti do poměru $D/L = 0,6$ a v případě Poissonova čísla do poměru $D/L = 0,4$. V závěru práce byla srovnána hodnota Youngova modulu pružnosti 1,97 GPa stanovená výpočtovým modelováním s hodnotou 1,56 GPa, která byla určena experimentálně na keramickém pěnovém materiálu s odpovídajícím charakterem struktury. Tento rozdíl byl způsoben idealizací geometrie reálného pěnového materiálu, jehož mechanické vlastnosti byly navíc ovlivněny strukturními vadami.

KLÍČOVÁ SLOVA

keramická pěnová struktura s otevřenou pórovitostí, mechanické vlastnosti, Kelvinova buňka, MKP

ABSTRACT

The thesis is concerned with creating of a computational model of open-cell ceramic foam and determining mechanical properties of open-cell ceramic foam using computational modeling. The geometry of Kelvin cell was used for creating the model of geometry of the foam. The model of geometry of ceramic foam structure was meshed with solid elements, with beam elements and with combination of rigid beam and beam elements. Elastic properties of the foam were determined by two types of mechanical loading. Young's modulus and Poisson's ratio were determined by tensile/compressive mechanical loading and shear modulus was determined by shear mechanical loading. The relationship between mechanical properties of the foam and the ratio of diameter of strut D and length of strut L was analysed in the thesis. A good agreement was found out between Young's modulus determined by solid element based and Young's modulus determined by modified beam based model of geometry of the foam structure – for ratio D/L up to 0,6. In the case of Poisson's ratio a good agreement was determined up to $D/L = 0,4$. In conclusion the value of Young's modulus 1,97 GPa which was determined by computational modeling was compared with the value 1,56 GPa which was determined experimentally on ceramic foam. This difference was caused by idealization of geometry of the real ceramic foam material. In addition, mechanical properties of the ceramic foam material are influenced by structural imperfections of the material.

KEYWORDS

open-cell ceramic foam structure, mechanical properties, Kelvin cell, FEM

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARANČÍK, M. *Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Skalka, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Skalky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. května 2017

.....
Milan Barančík

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu Ing. Petru Skalkovi, Ph.D. za odborné vedení, kritický úsudek a čas, který mi věnoval při přípravě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své matce, která mě po celou dobu studia podporovala, a zejména své přítelkyni, Lucii Stroupkové, za její všestrannou pomoc, trpělivost a neutuchající optimismus.

OBSAH

Úvod	15
1 Problémová situace	16
2 Formulace problému	17
3 Cíle řešení problému	18
4 Rešeršní studie	19
4.1 Klasifikace keramických porézních materiálů	19
4.2 Metody na přípravu keramických pěnových materiálů	20
4.2.1 Replikační metoda	20
4.2.2 Metoda přímého pění	21
4.2.3 Metoda obětovaného templátu	22
4.3 Vlastnosti keramických pěnových materiálů	23
4.3.1 Mechanické vlastnosti	23
4.3.2 Propustnost	25
4.3.3 Další vlastnosti	26
4.4 Aplikace keramických pěnových materiálů	26
5 Systém podstatných veličin	28
5.1 Systém podstatných veličin v souvislosti s řešeným problémem	28
5.2 Výběr metody řešení problému	30
5.3 Analýza typu problému	30
6 Výpočtové modelování	31
6.1 Model geometrie	31
6.1.1 Model geometrie elementární buňky	31
6.1.2 Substruktura elementární buňky	33
6.1.3 Model geometrie pěnové struktury	41
6.2 Model materiálových vlastností hutného keramického materiálu	44
6.3 Model okrajových podmínek a zatížení pěnové struktury	44
6.3.1 Model okrajových podmínek a zatížení při namáhání tahem/tlakem	44
6.3.2 Model okrajových podmínek a zatížení při namáhání smykem	46
7 Stanovení efektivních elastických konstant keramické pěnové struktury	48
8 Prezentace a analýza výsledků	51
8.1 Průběh mechanických vlastností v závislosti na velikosti modelu geometrie pěnové struktury	51
8.1.1 Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo	52
8.1.2 Modul pružnosti ve smyku	54
8.2 Závislost mechanických vlastností pěnové struktury na pórovitosti	56

8.2.1	Průběh mechanických vlastností pěnové struktury při zachování poměru D/L .	56
8.2.2	Srovnání mechanických vlastností v závislosti na typu prvků diskrétní sítě modelu geometrie pěnové struktury.....	59
8.2.3	Průběh mechanických vlastností v závislosti na poměru D/L	62
8.3	Experimentální určení mechanických vlastností keramické pěnové struktury [14]..	64
Závěr		65
Seznam použitých zkratek a symbolů		69
Seznam obrázků		71
Seznam tabulek		73
Seznam příloh		75

ÚVOD

Porézní materiály tvoří unikátní skupinu materiálů, které své uplatnění našly už před několika tisíci lety. Příkladem jsou dřevěné artefakty staré nejméně pět tisíc let, které předcházely egyptským pyramidám, nebo korkové uzávěry láhví na víno používané v období Římské říše. Kladný vztah lidí k tomuto typu materiálu přetrval až do současnosti – důkazem je vývoj různorodých technologických postupů za účelem výroby porézních materiálů a jejich aplikace jak v širokém spektru technických oborů, tak v každodenním životě. [1; 2]

Materiály s vysokým obsahem pórů vykazují specifické vlastnosti, kterých nemůže být dosaženo v případě hutných protějšků. Z tohoto důvodu nacházejí porézní materiály v nejrůznějších formách uplatnění nejen jako konečné produkty, ale zároveň v mnoha technologických procesech. Polymerní pěny se používají jako balicí fólie, ale i v kokpitu letadla jako pěnový potah pro případ havárie. Kovové porézní materiály nacházejí své uplatnění například jako lehčené hliníkové konstrukce užívané ve stavebnictví a letectví. [1; 2]

Diplomová práce je zaměřena na keramické materiály, u nichž byla přítomnost porozity až donedávna považována za problematickou. Nicméně v posledních desetiletích se výrazně navýšil počet aplikací, u nichž je požadována přítomnost keramických porézních materiálů. Uplatnění nacházejí například při filtraci taveniny kovů, jako součást tepelných izolačních systémů, jako nosný prvek při katalytických reakcích, při filtraci horkých korozivních plynů nebo jako porézní implantáty v oblasti biomateriálů. Keramické porézní materiály kombinují kladné vlastnosti keramického materiálu jako je vysoký bod tání nebo vysoká odolnost vůči korozi a mechanickému opotřebení spolu s vlastnostmi porézního materiálu jako je nízká tepelná vodivost, vysoká propustnost nebo velká povrchová plocha. Hlavní předností porézních materiálů je nízká relativní hustota, se kterou je spjata vysoká specifická pevnost [2]. Diplomová práce se konkrétně věnuje pěnovým materiálům, které tvoří jednu z podskupin porézních materiálů. Výše zmíněné vlastnosti jsou v případě keramického pěnového materiálu významným způsobem ovlivněny metodou, která byla k jeho výrobě zvolena. S ohledem na příslušnou aplikaci je pak možné vyrobit keramický pěnový materiál buď s otevřenou, nebo s uzavřenou pórovitostí, s určitou střední velikostí pórů a jejich morfologií. [3; 4]

V rešeršní části diplomové práce je shrnuta klasifikace porézních materiálů, jsou zde uvedeny základní metody na přípravu keramických pěnových materiálů, jejich vlastnosti a aplikace. Stěžejní částí diplomové práce je tvorba výpočtového modelu keramického pěnového materiálu s otevřenou pórovitostí a stanovení mechanických vlastností tohoto materiálu pomocí výpočtového modelování.

1 PROBLÉMOVÁ SITUACE

Při návrhu konstrukce a jejích částí je vždy nutná volba materiálu, která v souvislosti s aplikací tohoto materiálu zahrnuje požadavky, jako je maximální pevnost, minimální hmotnost, velká chemická odolnost apod. Obecně lze říci, že veškeré konstrukce a jejich součásti se vždy navrhují za účelem spolehlivého provozu v pracovních podmínkách a volba materiálu zde hraje důležitou roli. Z tohoto důvodu je podstatné znát mechanické vlastnosti zvoleného materiálu. Tato skutečnost platí i v případě keramického pěnového materiálu, jehož hlavní nevýhodou je nejčastěji křehký stav keramického materiálu často umocněný přítomností defektů v pěnové struktuře.

Určení mechanických vlastností jakéhokoliv materiálu je zároveň prvním krokem k pochopení jeho chování v zátěžném stavu. Výjimkou v tomto směru nejsou ani keramické pěnové materiály, u nichž je znalost mechanických vlastností důležitá také pro vývoj těchto materiálů s lepší schopností odolávat mechanickému namáhání.

2 FORMULACE PROBLÉMU

Většina metod na přípravu porézních materiálů představuje proces, na jehož konci vzniká strukturně složitý materiál, pro který je charakteristická nepravidelnost a nahodilost. V případě keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí to vyjadřují především tyto vlastnosti: různorodá velikost a tvar pórů, rozličná velikost a tvar průřezu trámečků – obě tyto veličiny se po délce trámečku mohou měnit, dále přítomnost strukturních vad jako jsou vzduchové dutiny uvnitř trámečků a jiné. Zahrnutí všech strukturních vlastností pěnového materiálu do jeho výpočtového modelu je velmi obtížné jak z hlediska strukturní nahodilosti, tak s ohledem na vysoké nároky na hardware. Z tohoto důvodu je důležité hledat ty strukturní vlastnosti, které jsou při určování mechanických vlastností podstatné. Tato skutečnost spolu s těmi motivačními zmíněnými v kapitole Problémová situace vedou k formulaci problému:

Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí metodou konečných prvků.

3 CÍLE ŘEŠENÍ PROBLÉMU

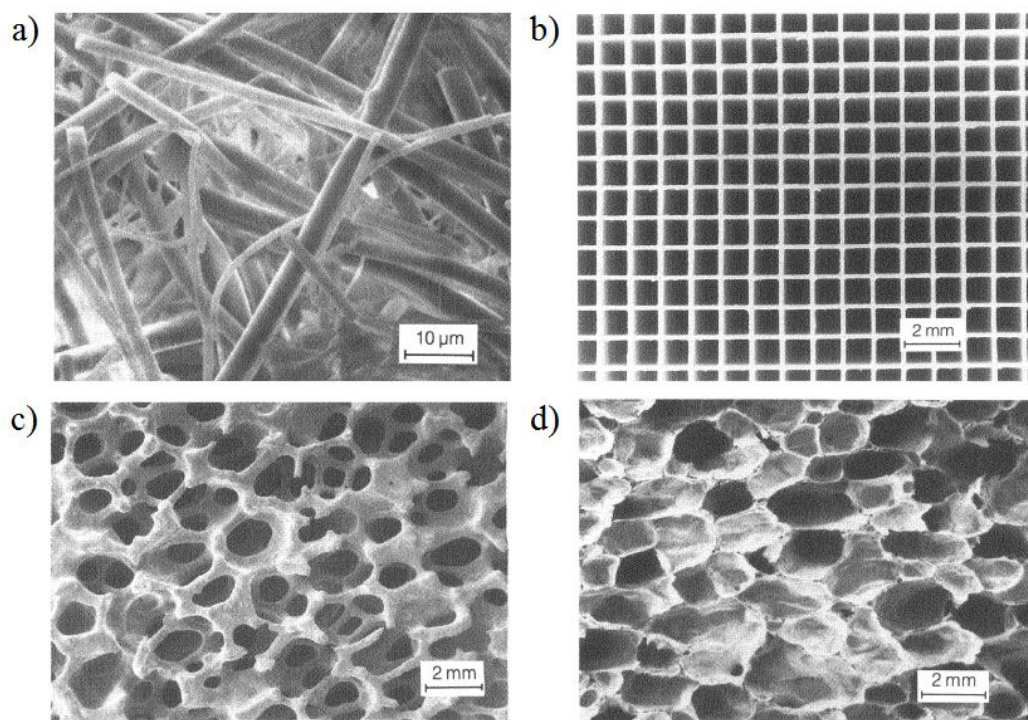
Cíle vyplývající z formulace problému byly stanoveny následovně:

- Vytvoření výpočtového modelu keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí.
- Zahrnutí podstatných veličin, které by zvýšily soulad mechanických vlastností pěnové struktury určených výpočtovým modelováním a experimentem.
- Stanovení mechanických vlastností keramické pěnové struktury výpočtovým modelováním.
- Analýza a experimentální verifikace mechanických vlastností keramické pěnové struktury určených výpočtovým modelováním.

4 REŠERŠNÍ STUDIE

4.1 KLASIFIKACE KERAMICKÝCH PORÉZNÍCH MATERIÁLŮ

Keramické porézní materiály jsou reprezentovány dvěma hlavními skupinami porézních materiálů – vláknovými a celulárními. Vláknový keramický materiál je tvořen sítí navzájem propojených vláken keramického materiálu. V případě skelných vláken pak takový materiál nachází uplatnění jako součást tepelného ochranného systému u vesmírných raketoplánů, mikrostruktura tohoto materiálu je ukázána na obrázku 4.1a. Celulární keramické materiály se sestávají z pórů, které jsou obklopeny trámečky nebo stěnami keramického materiálu – dohromady pak tvoří elementární buňky keramického celulárního materiálu. Tyto keramické materiály se dále dělí na pěnové s nepravidelnou strukturou a tzv. honeycomby s pravidelnou strukturou. Pěnové keramické materiály pak mohou mít pórovitost otevřenou, nebo uzavřenou. Mikrostruktury těchto materiálů jsou postupně ukázány na obrázku 4.1b, 4.1c a 4.1d. Jelikož se diplomová práce zabývá pěnovými keramickými materiály, budou další kapitoly rešeršní části zaměřeny na tento typ materiálů. [1, 3]



Obr. 4.1 Mikrostruktura keramického materiálu: a) vláknového, b) celulárního s pravidelnou mřížkou, c) pěnového s otevřenou pórovitostí, d) pěnového s uzavřenou pórovitostí [3].

4.2 METODY NA PŘÍPRAVU KERAMICKÝCH PĚNOVÝCH MATERIÁLŮ

Na základě širokého pásma aplikací, ve kterých se uplatňují keramické pěnové materiály, jsou u těchto materiálů požadovány velmi různorodé vlastnosti. Neexistuje však jedna univerzální metoda, pomocí níž by bylo možné vyrobit keramický pěnový materiál s požadovanou mikrostrukturou. Tento fakt vedl k vývoji mnoha postupů na přípravu keramických pěnových materiálů, které byly patentovány v zemích po celém světě. Podle základních principů je lze rozdělit do tří skupin. První a zároveň nejstarší z těchto přístupů je založen na replikaci polymerní pěny sloužící jako templát, na který je nanášena keramická suspenze. V průběhu procesu spékání keramické pěny je polymerní pěna vypálena. Přestože má replikace polymerního templátu negativní vliv na mechanické vlastnosti keramického pěnového materiálu, je tato metoda průmyslově nejrozšířenější. Keramické pěny s otevřenou pórovitostí nacházejí uplatnění například jako filtry pro taveniny kovů. Druhý základní přístup na výrobu pěnové keramiky vychází z napěnění keramické suspenze, čehož je dosaženo buď mechanickým mícháním, nebo přímým prosycováním plynem. Tato metoda umožňuje vyrábět keramické pěnové materiály s rozmanitými strukturami, ovšem pórovitost těchto materiálů není tak otevřená v porovnání s keramickou pěnou vyrobenou replikační metodou. Keramické pěny s uzavřenou pórovitostí nacházejí uplatnění například při tepelné izolaci. Poslední přístup je založen na přítomnosti přírodních nebo syntetických aditiv, která jsou během spékání keramického materiálu vypálena. Množstvím obětních aditiv lze ovlivnit charakter porozity keramického pěnového materiálu. [4]

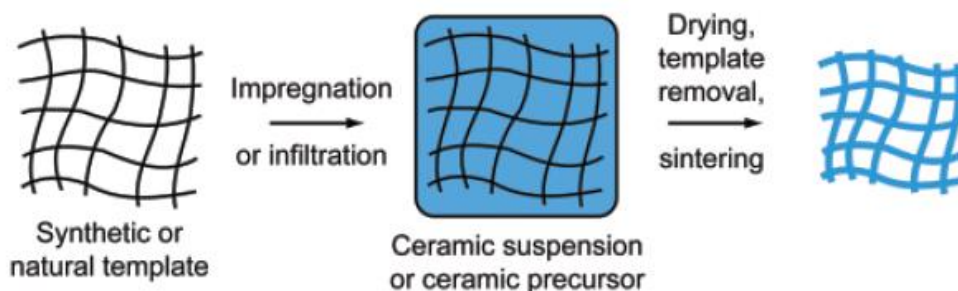
Dále budou ke každé ze zmíněných metod na přípravu keramických pěnových materiálů uvedeny podrobnější informace.

4.2.1 REPLIKAČNÍ METODA

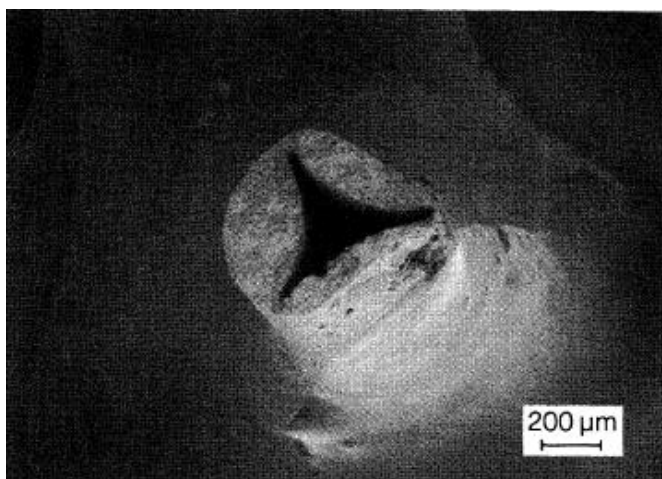
Replikační metoda je považována za první metodu, která byla použita pro výrobu keramického pěnového materiálu. Už v šedesátých letech dvacátého století se začaly užívat polymerní pěny jako templáty k výrobě pěnové keramiky s různou velikostí pórů, pórovitostí a chemickým složením. Od té doby se replikace polymerní pěny stala nejpopulárnější metodou na výrobu keramických pěn a je dodnes intenzivně využívána v průmyslové výrobě. Schéma procesu výroby keramického pěnového materiálu pomocí této metody je znázorněno na obrázku 4.2. [2]

Principem metody je ponoření porézní polymerní pěny (například polyuretanu) do keramické suspenze, dokud nejsou vnitřní póry zaplněny keramickým materiálem. Přebytková keramická suspenze je z impregnované pěny odstraněna válcováním. Polymerní templát s nanesenou vrstvou keramické suspenze je následně sušen a pyrolyzován v teplotním rozmezí 300–800 °C. Ohřev je obvykle nižší než 1 °C/min, aby se předešlo vzniku zbytkových napětí uvnitř trámeček. Po odstranění polymerního templátu je keramický povlak slinován při teplotách v rozmezí 1100–1700 °C. Replikační metodou lze u keramické pěny dosáhnout pórovitosti v rozsahu 40–95 % a velikosti pórů od 200 µm do 3 mm. [2]

Nevýhodou replikační metody je minimální dosažitelná velikost póru přibližně 200 µm z důvodu obtížné impregnace polymerní pěny s velmi úzkými póry. Negativní vliv má také odstranění polymerního templátu na konečné mechanické vlastnosti keramické pěny. Během tohoto procesu dochází k porušení struktury keramického pěnového materiálu. Na obrázku 4.3 je ukázána dutina uvnitř trámečky, která vznikla po odstranění templátu. [2]



Obr. 4.2 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu replikační metodou [2].



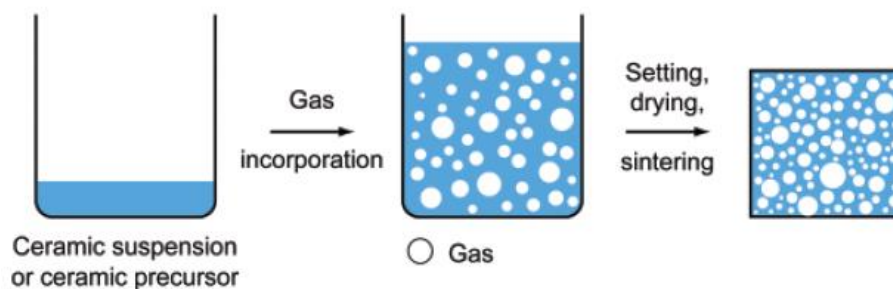
Obr. 4.3 Dutina uvnitř trámečku vzniklá po odstranění polymerního templátu [3].

4.2.2 METODA PŘÍMÉHO PĚNĚNÍ

Metoda přímého pění je založena na procesu prosycování keramické suspenze plynem. Takto připravená směs je následně slinována za vysokých teplot. Keramické pěny připravené touto metodou vykazují vyšší pevnost v porovnání s keramickými pěny připravenými replikační metodou. Schéma výroby pěnové keramiky metodou přímého pění je ukázáno na obrázku 4.4. [2]

Celková pórovitost je přímo úměrná množství přítomného plynu v keramické suspenzi. Na druhé straně je však velikost pórů také závislá na stabilitě směsi tvořené keramickou suspenzí a plynem. Tato směs je termodynamicky nestálá a podléhá procesu slučování bublin plynu v keramické suspenzi za účelem snížení vnitřní energie. Výsledkem je pak struktura keramické pěny se značně navýšenou velikostí pórů. Stabilizace keramické suspenze prosycené plynem je nejproblémovější částí v případě metod využívajících přímého pění – tuto směs je možné stabilizovat pomocí surfaktantů nebo částic tuhé látky (popřípadě jiným způsobem). Ke stabilizaci pomocí surfaktantů se používají dlouhovláknové molekuly, které zpomalují proces slučování bublin plynu na základě snížení povrchové energie na rozhraní kapalně a plynné fáze. V případě stabilizace částicemi tuhé látky dochází efektivnímu navázání těchto částic na rozhraní kapaliny a plynu a tím opět ke snížení povrchové energie. Za tímto účelem se používají například částice hliníku, které jsou modifikovány hydrofobní látkou. Při použití surfaktantů je dosaženo stabilizace směsi keramické suspenze a plynu na dobu v řádech minut, maximálně několika hodin, naopak pomocí částic tuhé látky je možné tuto směs stabilizovat až na několik dnů. [2]

Pomocí metody přímého pění je možné vyrobit keramické pěny s otevřenou i uzavřenou pórovitostí, která se může pohybovat v rozmezí 40–97 %. Výhodou je absence procesu pyrolýzy – nedochází tak tímto způsobem k porušení struktury keramické pěny. Při užití surfaktantů ke stabilizaci směsi keramické suspenze a plynu je možné dosáhnout velikosti pórů od 35 μm do 1,2 mm, pokud se užijí ke stabilizaci částice tuhé látky, je možné velikost pórů snížit až na 10 μm . [2]



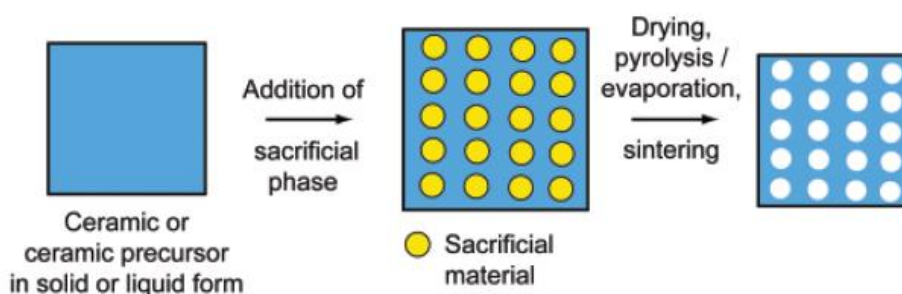
Obr. 4.4 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu metodou přímého pění [2].

4.2.3 METODA OBĚTOVANÉHO TEMPLÁTU

Metoda obětovaného templátu zahrnuje přípravu dvoufázové směsi, která se sestává z templátové fáze rovnoměrně rozptýlené v keramické suspenzi. Tato metoda vede k přípravě negativní repliky obětovaného templátu v porovnání s pozitivní morfologií obdrženou pomocí replikační metody, viz obrázek 4.5. [2]

Jako obětovaný materiál se užívají syntetické a přírodní organické sloučeniny, soli, kapaliny, kovy nebo keramické částice. Syntetické a přírodní organické sloučeniny jsou extrahovány pyrolýzou za vysokých teplot v intervalu 200–600 $^{\circ}\text{C}$. Časově náročný proces pyrolýzy organické komponenty a značné množství uvolňovaných plynů jako vedlejších produktů extrakce jsou hlavními nevýhodami užití organických sloučenin jako obětního materiálu. V případě užití tekutiny, například vody nebo nestálého oleje, dojde při extrakci k jejímu vypaření nebo sublimaci. Proces extrakce je však i v tomto případě zdoluhavý. Soli, kovy a keramické částice jsou odstraňovány chemickou cestou. [2]

Jednou z hlavních výhod užití obětovaného templátu při výrobě keramické pěny je možnost připravit strukturu keramického pěnového materiálu s požadovanou pórovitostí a velikostí pórů na základě vhodného výběru obětního materiálu. Touto metodou lze dosáhnout pórovitosti v rozmezí 20–90 % a velikosti pórů od 1 μm do 700 μm . [2]



Obr. 4.5 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu pomocí metody obětovaného templátu [2].

4.3 VLASTNOSTI KERAMICKÝCH PĚNOVÝCH MATERIÁLŮ

4.3.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Mechanické vlastnosti keramických pěn mají velký význam v oblasti aplikací, kde keramická komponenta zastává primárně nebo výhradně mechanickou funkci. Nicméně mechanické vlastnosti jsou podstatné i v případech, kdy nemá keramická pěna výhradně mechanickou funkci, ale je použita například při tepelné izolaci, filtraci nebo jako katalyzátor. V těchto případech dochází také k mechanickému namáhání keramické pěny, tudíž je nutné znát chování těchto materiálů, aby mohly plnit požadovanou funkci. [5]

Primární význam mají v případě keramické pěnové struktury následující mechanické vlastnosti: elastické moduly (především Youngův modul pružnosti), Poissonovo číslo, lomová houževnatost, pevnost v tahu, pevnost v tlaku a odolnost vůči teplotnímu zatížení. Dále mohou být významné vlastnosti jako tvrdost, schopnost odolávat erozi a opotřebení nebo rychlost šíření zvuku. [5]

Nejen mechanické vlastnosti keramické pěny, ale i mnohé další, významným způsobem závisejí na velikosti a charakteru pórovitosti – většina mechanických vlastností se snižuje se zvyšující se pórovitostí. Zásadní význam však mají také vlastnosti hutného materiálu, ze kterého je keramická pěna vyrobena. Z tohoto důvodu se mechanické vlastnosti keramického pěnového materiálu s danou pórovitostí uvádějí jako normalizované vůči mechanickým vlastnostem keramického materiálu s teoretickou hustotou, resp. nulovou pórovitostí. [5]

MODELOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA PÓROVITOSTI

Existuje více přístupů k modelování mechanických vlastností pěnových keramik, zde bude nastíněn náhled na čtyři metody, jejichž výhodou není jen funkcionalita, ale i praktické využití. První přístup, nejstarší z uvedených, byl odvozen za účelem stanovení elastických modulů, především Youngova modulu pružnosti. Tento model je založen na empirickém a částečně i analytickém základě a vychází z rovnoměrně rozmístěných kulových pórů v keramickém materiálu. Vztah pro modul pružnosti pak vypadá následovně:

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n = (1 - P)^n, \quad (1)$$

kde podíl E/E_0 vyjadřuje hodnotu normalizovaného Youngova modulu pružnosti, ρ je objemová hmotnost keramické pěny pro danou pórovitost P , ρ_0 je teoretická hustota keramického materiálu (s nulovou pórovitostí) a n je experimentálně stanovený parametr, obvykle z intervalu 1–3. Analogický vztah se užívá i pro další mechanické vlastnosti, především v případě pevností. Tento model má však několik nedostatků, jedním z nich je skutečnost, že neumí zahrnout vliv mikrostruktury – charakter pórovitosti a parametr n jsou vzájemně nezávislé. [5]

S dalším přístupem přišli autoři Gibson a Ashby, jejichž model klade větší důraz na mikrostrukturu pěnového materiálu. Tento model idealizuje geometrii pěnové struktury na síť vzájemně propojených elementárních buněk krychlového tvaru. Charakteristickými rozměry elementární buňky pěnové struktury s otevřenou pórovitostí jsou tloušťka tramečky t a jeho délka L , viz obrázek 4.6a. Rozmístění elementární buňky pěnového materiálu spolu s ostatními buňkami v prostoru je ukázáno na obrázku 4.6b. Mechanické vlastnosti jsou pak vyjádřeny jako funkce charakteristických rozměrů elementární buňky. Autoři vychází

z předpokladu, že pro vyšší pórovitosti a pro struktury s otevřenou pórovitostí lze relativní hustotu vyjádřit následovně:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = C_1 \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^2, \quad (2)$$

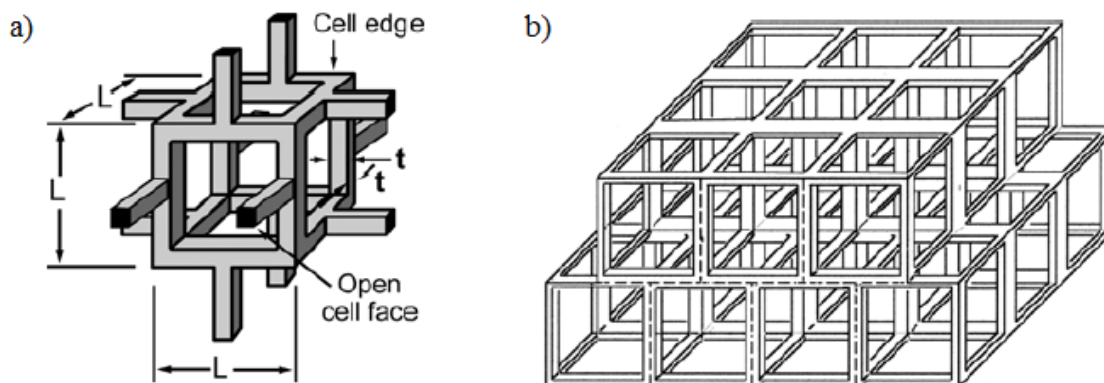
kde číselná konstanta C_1 závisí na tvaru elementární buňky. V případě nižších pórovitostí (menších než 90 %) je rovnice (2) modifikována na tvar, který zahrnuje kumulaci materiálu v rozích elementární buňky [6]. Normalizovaný Youngův modul pružnosti je uváděn ve tvaru:

$$\frac{E}{E_0} = C_3 \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^4, \quad (3)$$

kde C_3 je konstanta úměrnosti závislá na geometrii mikrostruktury. Dosazením z rovnice (2) do rovnice (3) pro $C_1 = 1$ pak lze získat normalizovaný Youngův modul pružnosti v závislosti na relativní hustotě keramické pěny:

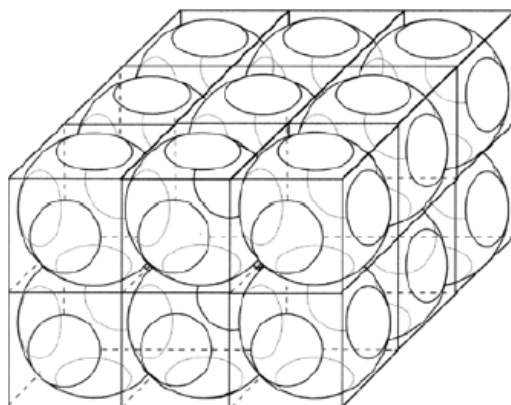
$$\frac{E}{E_0} = C_3 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^2. \quad (4)$$

Další mechanické vlastnosti jsou odvozeny analogickým způsobem, tzn. jsou vyjádřeny (mimo jiné) jako funkce konstanty úměrnosti závislé na geometrii mikrostruktury a relativní hustoty. Nevýhodou Gibson–Ashbyho modelů je skutečnost, že neumí postihnout změnu charakteru struktury a chování keramické pěny při přechodu z nízkých do vysokých pórovitostí. [3; 5]



Obr. 4.6 a) Elementární buňka pěnového materiálu s otevřenou pórovitostí podle Gibsona a Ashbyho [7] a b) její rozmístění v prostoru spolu s ostatními buňkami [5].

V literatuře [5] je následně uveden podrobnější popis MSA modelů (z angl. Minimum Solid Area) mechanických vlastností, které pokrývají širší interval pórovitostí pěnových materiálů. Matematické vyjádření mechanických vlastností však vychází pouze z doplnění výše uvedených modelů. Jednotlivé modely se liší v závislosti na způsobu zjednodušení mikrostruktury pěnového materiálu – elementární buňka může mít tvar krychle obsahující pór kulového tvaru (obrázek 4.7), anebo naopak může být pór obklopen vzájemně souvislými kuličkami keramického materiálu apod. Výsledkem MSA modelování nejsou přímo vztahy pro mechanické vlastnosti, ale jejich grafické znázornění v závislosti na relativní hustotě. Tyto závislosti se pak aproximují pomocí exponenciální funkce.



Obr. 4.7 Síť elementárních buněk krychlového tvaru s kulovými póry [5].

Poslední zde uvedený přístup je založen na modelování pomocí počítačů. Jednou z možností je rozšíření MSA modelů, ovšem progresivní vývoj výpočetní techniky umožnil řešit složité problémy pomocí metody konečných prvků, která už byla k modelování mechanických vlastností využita. Úlohy je pak možné řešit jako dvourozměrné – pokud to z hlediska řešené úlohy je možné nebo jako trojrozměrné. Prostorové úlohy jsou však náročnější jak z hlediska požadavků na hardware, tak na výpočtový čas. [5]

EXPERIMENTÁLNÍ DATA A VERIFIKACE MODELŮ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Literatura [3] a [6] je zaměřena na mechanické vlastnosti pěnových keramických materiálů. V případě konkrétních mechanických vlastností (elastické chování, pevnost v tahu apod.) jsou zde uvedena experimentální data, která jsou srovnána s Gibson-Asbyho modely mechanických vlastností. Analýza je provedena v závislosti na relativní hustotě, poměru tloušťky trámečku a jeho délce, střední velikosti buněk a v některých případech na velikosti zkušebního vzorku. K experimentům byly použity keramické pěny připravené z oxidu hliníku, jeho směsi s oxidem zirkonia a karbidu křemíku. V literatuře [3] je uveden rozbor mechanických vlastností i pro keramické pěny s uzavřenou pórovitostí a v závěru se věnuje vlivu vysokých teplot na mechanické vlastnosti keramických pěn.

Experimentální studie na mechanické vlastnosti pěnové keramiky s otevřenou pórovitostí dávají rozumnou shodu s teorií, především v závislosti na hustotě. Přesto však geometrické konstanty vycházejí menší, než doporučují autoři Gibson a Ashby. Aplikovatelnost modelů mechanických vlastností závisí především na tom, do jaké míry je porozuměno makrostruktuře a mikrostruktuře keramických pěn. V některých případech keramických pěn s otevřenou pórovitostí může přítomnost strukturních vad (např. defektů nebo uzavřených buněk) značně ovlivnit makroskopické mechanické vlastnosti tohoto materiálu. [3]

4.3.2 PROPUSTNOST

Prostup tekutiny keramickým pěnovým materiálem je často využívaným procesem v technických aplikacích. Díky pěnové struktuře nedochází k velkému poklesu tlaku během průchodu tekutiny pěnou a keramický materiál je možné použít i v chemicky agresivních prostředích a při vyšších teplotách. Schopnost propouštět tekutinu závisí na strukturních vlastnostech keramického pěnového materiálu, především na počtu pórů, velikosti buněk a tloušťce trámečků. Keramické pěny připravené replikační metodou nalézají uplatnění především jako filtry tavenin kovů, ovšem v poslední době se začínají používat i v dalších

aplikacích při spalování plynů, čištění horkými plyny nebo přenosu tepla. Keramické pěny vyrobené metodou přímého pění mají obdobné využití, navíc se však tyto materiály používají v biomedicínských aplikacích jako matrice pro tkáňové inženýrství, při obnově kostní tkáně apod. V takovém případě se k jejich výrobě používají čisté materiály jako je hydroxyapatit nebo kalcium fosfát. [8]

4.3.3 DALŠÍ VLASTNOSTI

V případě mnoha aplikací jsou keramické pěny v jejich pracovním prostředí vystavovány vysokým teplotám (tepelné výměníky, porézní hořáky, izolační materiály apod.), z toho důvodu je podstatné znát tepelné vlastnosti těchto materiálů. Obdobně jako v případě mechanických vlastností, tepelné vlastnosti závisí na chemickém složení keramického pěnového materiálu a na metodě jeho výroby. Mezi důležité tepelné vlastnosti keramických pěn patří tepelná kapacita a tepelná vodivost – ta je v případě pěnových materiálů s otevřenou pórovitostí více komplexní a teplotně závislá. [9]

Důležitou roli mohou hrát také elektrické vlastnosti, které obecně závisí na struktuře keramických pěn, tzn. na množství buněk (pórů), na jejich charakteristických rysech apod. Podstatný vliv má objemový podíl pórů a typ keramického materiálu. V případě elektrické vodivosti je podstatná plocha průřezu trámečků, velikost a tvar pórů, typ hranice mezi zrny keramického materiálu a jeho elektrické vlastnosti. [10]

4.4 APLIKACE KERAMICKÝCH PĚNOVÝCH MATERIÁLŮ

Použití keramických pěn bylo v obecném smyslu uvedeno v úvodu a napříč jednotlivými podkapitolami rešeršní části. Keramické pěnové materiály mají mnoho kladných vlastností, na základě kterých mohou nalézt uplatnění také v konstrukčních aplikacích. Zvláště v případě, kdy je požadována maximální tuhost a pevnost při minimální hmotnosti, mohou keramické pěny předčít své hutné protějšky. Tento fakt může být dále využit v případě, že je keramická pěna použita jako součást kompozitního materiálu, například jako jádro v sendvičovém kompozitu nebo jako keramická matrice vyztužená povlakem. [3]

V článku [11] je uvedena experimentální analýza mechanických vlastností keramického pěnového materiálu (bioskla) v závislosti na typu naneseného povlaku. Mechanické vlastnosti nepovlakovaného pěnového materiálu jsou zde srovnány s případem, kdy byl tento materiál povlakován polyvinyl alkoholem v kombinaci s celulózovými mikrovláknami. V článku je ukázáno, že má povlak pozitivní vliv na mechanické vlastnosti bioskla.

Zajímavým využitím keramického pěnového materiálu je funkce pohlcovače slunečního záření umístěného na vrcholu věže, která spolu s okolní soustavou zrcadel tvoří solární elektrárnu (obrázek 4.8). Sluneční záření se odráží od zrcadel a dopadá na keramickou pěnu s otevřenou pórovitostí, jejíž teplota dosahuje až 700 °C. Absorbované teplo je odváděno pomocí ohřáté páry k parní turbíně, kde dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou. [12]

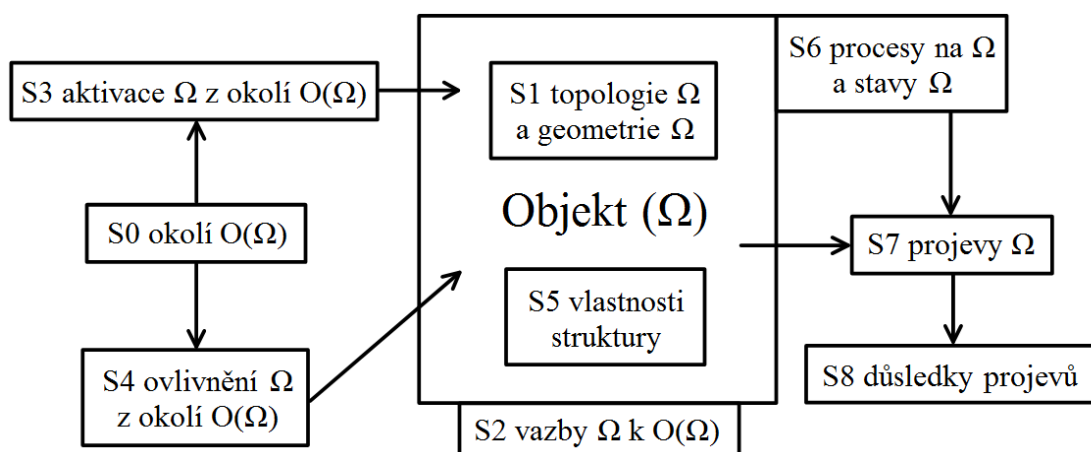


Obr. 4.8 Solární elektrárna využívající keramický pěnový materiál k přeměně tepelné energie na elektrickou [12].

5 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

Při řešení problémových situací je důležité si uvědomit, které skutečnosti a činnosti jsou z hlediska řešeného problému důležité. Systémem podstatných veličin $\Sigma(\Omega)$ se pak v systémové metodologii nazývá množina všech podstatných veličin (a potenciálních vazeb mezi nimi), které souvisejí s řešením problému na objektu Ω . [13]

Struktura Systému veličin $\Sigma(\Omega)$ obsahuje devět podmnožin a je ukázána na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Podmnožiny Systému veličin $\Sigma(\Omega)$ [13].

V následujících podkapitolách jsou uvedeny podmnožiny Systému veličin $\Sigma(\Omega)$ spolu s jejich vlastnostmi ve spojitosti s řešeným problémem v diplomové práci, dále pak výběr metody řešení tohoto problému a analýza jeho typu.

5.1 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN V SOUVISLOSTI S ŘEŠENÝM PROBLÉMEM

Podmnožina S0 – Okolí objektu

- Okolí keramického pěnového materiálu může být zdrojem různých typů zatížení, například silového, deformačního nebo teplotního, dále může být zdrojem chemického ovlivnění apod.
- Za účelem nalezení mechanických vlastností se jevílo jako podstatné pouze silové zatížení.

Podmnožina S1 – Topologie a geometrie objektu

- Keramická pěnová struktura s otevřenou pórovitostí je tvořena velkým množstvím pórů, které obklopují trámečky keramického materiálu.
- Geometrie a rozmístění pórů a trámečků jsou v keramické pěnové struktuře náhodné.
- Zahrnutí stochastického charakteru geometrie pěnové struktury do jejího výpočtového modelu tak, aby odpovídala reálné struktuře, je náročné – jedním z přístupů bylo vytvoření modelu geometrie substruktury pěnového materiálu (elementární buňky), která se v celém materiálu opakovala, viz kapitola Model geometrie pěnové struktury.

Podmnožina S2 – Vazby objektu s okolím

- Při určování mechanických vlastností keramické pěnové struktury pomocí výpočtového modelování bylo nutné aplikovat odpovídající okrajové podmínky, viz kapitola Model okrajových podmínek a zatížení pěnové struktury.

Podmnožina S3 – Aktivační veličiny

- Výpočtový model keramické pěnové struktury byl aktivován silovým zatížením vyvolávajícím příslušné namáhání (tah/tlak, smyk), jehož charakter určoval typ a způsob hledání mechanických vlastností.
- Veškeré výpočty byly realizovány jako statické, tzn. časová proměnnost silového zatížení byla při určování mechanických vlastností pěnové struktury nepodstatná.

Podmnožina S4 – Ovlivňující veličiny

- Ve výpočtovém modelování nebyly uvažovány žádné ovlivňující veličiny, při použití metody konečných prvků jsem se nezabýval procesy na jednotlivých prvcích.

Podmnožina S5 – Vlastnosti prvků struktury objektu

Velikost a tvar pórů

- Obě tyto veličiny mají stochastický charakter, ovšem vzhledem ke složitosti zahrnutí tohoto charakteru do výpočtového modelu pěnové struktury se s nimi pracovalo na úrovni deterministické.
- K vytváření modelu geometrie pěnové struktury se přistupovalo na základě velikosti elementární buňky s nejčtetnějším výskytem ve struktuře materiálu.
- Model geometrie elementární buňky vycházel z geometrie Kelvinovy buňky, viz kapitola Model geometrie elementární buňky.

Velikost a tvar průřezu trámečků

- Obě tyto veličiny mají stochastický charakter a platily pro ně obdobné skutečnosti jako v případě velikosti a tvaru póru.
- Velikost průřezu trámečku byla stanovena na základě pórovitosti pěnové struktury a velikosti elementární buňky s nejčtetnějším výskytem.
- Při vytváření modelu geometrie pěnové struktury byl tvar průřezu trámečků idealizován na kruhový a nebyly uvažovány dutiny uvnitř trámečku.
- Za podstatné se považovalo lokální zpevnění v oblasti sbíhání trámečků, které bylo způsobeno souvislým přechodem trámečků v místě jejich styku, viz kapitola Substruktura elementární buňky.

Mechanické vlastnosti hutného keramického materiálu

- Protože se řešeným problémem dosud nikdo významně nezabýval ani na deterministické úrovni, uvažoval jsem mechanické vlastnosti keramického materiálu jako deterministické, přestože si uvědomuji, že mají obecně stochastický charakter.

Podmnožina S6 – Procesy na objektu a jeho stavy

- Z hlediska řešeného problému byly podstatné deformační a napěťové stavy, dále nebyly rozvíjeny mezní stavy napjatosti.

Podmnožina S7 – Projevy objektu

- Projevem modelu geometrie pěnové struktury byla deformační odezva v závislosti na charakteru namáhání.

Podmnožina S8 – Důsledky projevů objektu

- Na základě projevů pěnové struktury (deformace a napětí) byly určovány příslušné mechanické vlastnosti.

5.2 VÝBĚR METODY ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Pro řešení problému v diplomové práci byl zvolen přístup nepřímý a s ohledem na výše uvedené podstatné veličiny bylo při výběru metody řešení problému zvoleno výpočtové modelování. Tato metoda umožňuje vytvářet efektivní výpočtové modely, urychluje procesy při řešení daného problému a umožňuje hlubší analýzu výsledků.

Veškeré výpočtové modely byly vytvořeny v programovém systému ANSYS a byly v něm provedeny také všechny výpočty. S ohledem na křehký stav keramického materiálu (při větších deformacích dochází k jejímu porušení) byly při všech výpočtech uvažovány malé deformace.

5.3 ANALÝZA TYPU PROBLÉMU

Řešení problému v diplomové práci zahrnovalo problém jak přímý, tak nepřímý. V případě přímého problému byla na základě známých vstupů do výpočtového modelu pěnové struktury (model geometrie, model okrajových podmínek apod.) hledána její deformační odezva na silové zatížení.

Naopak nepřímý problém zahrnoval proces hledání příčin na základě známých důsledků. V diplomové práci tomu odpovídalo stanovení mechanických vlastností pěnové struktury na základě deformační odezvy jejího modelu geometrie.

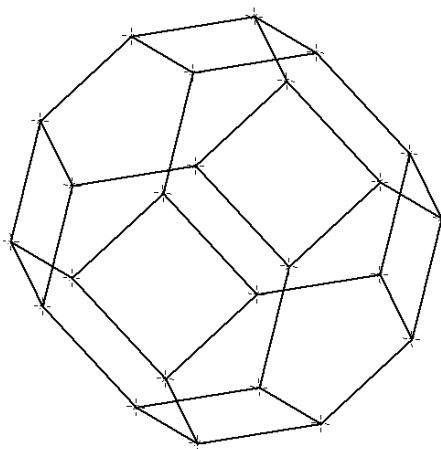
6 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Při tvorbě výpočtového modelu keramické pěnové struktury se v diplomové práci vycházelo z experimentálního měření uvedeného v disertační práci [14], která se zabývá experimentálním stanovením mechanických vlastností keramických pěn. Pro experimenty byl mj. využit keramický pěnový materiál vyrobený ze směsi oxidu hliníku, křemíku a hořčíku s názvem Vukopor®A. Tato keramická pěna byla připravena ve dvou variantách – se střední velikostí pórů 2,2 mm a 0,8 mm. Pórovitost pěnové struktury byla v obou případech 85 %. Youngův modul pružnosti hutného keramického materiálu byl stanoven a ověřen třemi metodami – impulzní excitační metodou, zkouškou tříbodovým ohybem a indentační zkouškou a jeho hodnota se pohybovala v intervalu 80–100 GPa. Nejmenší směrodatná odchylka (1,68 GPa) byla uvedena v případě impulzní excitační metody, pomocí které byla stanovena střední hodnota tohoto modulu pružnosti 90,1 GPa. [14]

6.1 MODEL GEOMETRIE

6.1.1 MODEL GEOMETRIE ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

Geometrie substruktury pěnového materiálu (elementární buňky) byla idealizována pomocí geometrie Kelvinovy buňky, kterou tvoří komolý osmistěn, viz obrázek 6.1. Hrany Kelvinovy buňky představovaly trámečky keramické struktury, které byly diskretizovány objemovými nebo prutovými prvky.



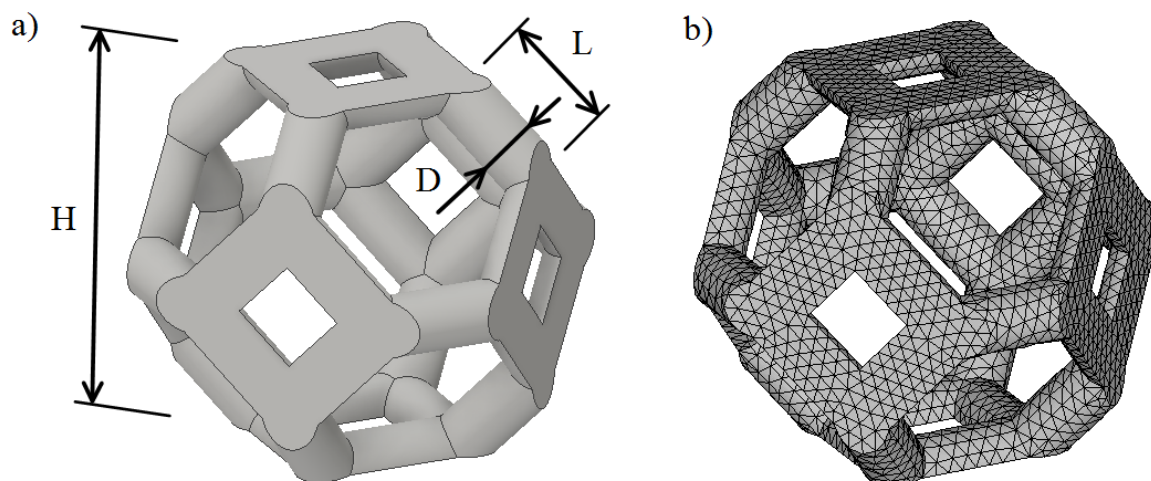
Obr. 6.1 Geometrie Kelvinovy buňky.

DISKRETIZACE MODELU GEOMETRIE ELEMENTÁRNÍ BUŇKY OBJEMOVÝMI PRVKY

V programu Inventor byl vytvořen model geometrie elementární buňky s trámečky, jejichž tvar byl idealizován na válcový. Průměr průřezu trámečků byl určen na základě velikosti elementární buňky 0,8 mm a pórovitosti 85 % z rovnice:

$$P = 0,85 = \frac{1 - V_{tr}}{V_c}, \quad (5)$$

kde V_{tr} označoval objem trámečků elementární buňky získaný pomocí programu Inventor a V_c byl celkový objem krychle, ve které je elementární buňka umístěna. Rovnice (5) byla splněna pro průměr průřezu trámečků o velikosti $D = 0,13$ mm. Na obrázku 6.2a je ukázán model geometrie elementární buňky spolu s označením charakteristických rozměrů, kde parametr H označoval velikost elementární buňky, L délku trámečku a D průměr jeho průřezu. Diskretizace tohoto modelu geometrie objemovými prvky je pak ukázána na obrázku 6.2b. V případě objemových prvků byla diskrétní síť vždy vytvářena pomocí kvadratického čtyřstěnu s označením SOLID187.

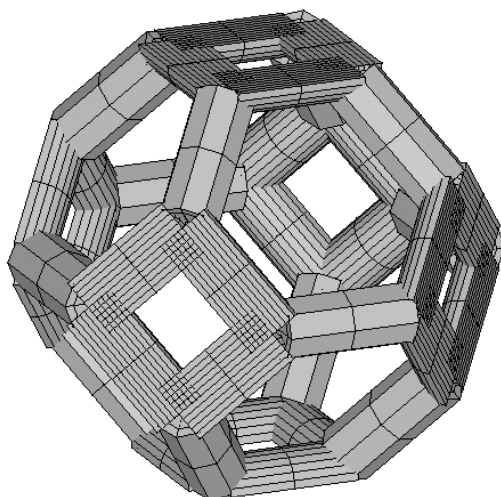


Obr. 6.2 a) Model geometrie elementární buňky vytvořený v programu Inventor a b) diskretizace tohoto modelu objemovými prvky.

Model geometrie elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky obsahoval velké množství uzlů, resp. stupňů volnosti. Počet stupňů volnosti pak výrazně narůstá v případě, kdy je modelu geometrie pěnové struktury vytvořen z mnoha elementárních buněk.

DISKRETIZACE MODELU GEOMETRIE ELEMENTÁRNÍ BUŇKY PRUTOVÝMI PRVKY

Trámečky pěnové struktury svým tvarem připomínaly prutová tělesa, proto se nabízela možnost diskretizovat model geometrie elementární buňky prutovými prvky. Model geometrie pěnové struktury diskretizovaný prutovými prvky pak obsahoval významně menší množství uzlů, resp. stupňů volnosti, než v případě diskretizace prvky objemovými. Na obrázku 6.3 je model geometrie elementární buňky diskretizovaný prutovými prvky. K tomuto účelu byl využit kvadratický prutový prvek s označením BEAM189. Trámečky nacházející se po stranách elementární buňky v pěnové struktuře zároveň náleží sousedním elementárním buňkám, z tohoto důvodu byly tyto trámečky diskretizovány prutovými prvky s půlkruhovým průřezem.

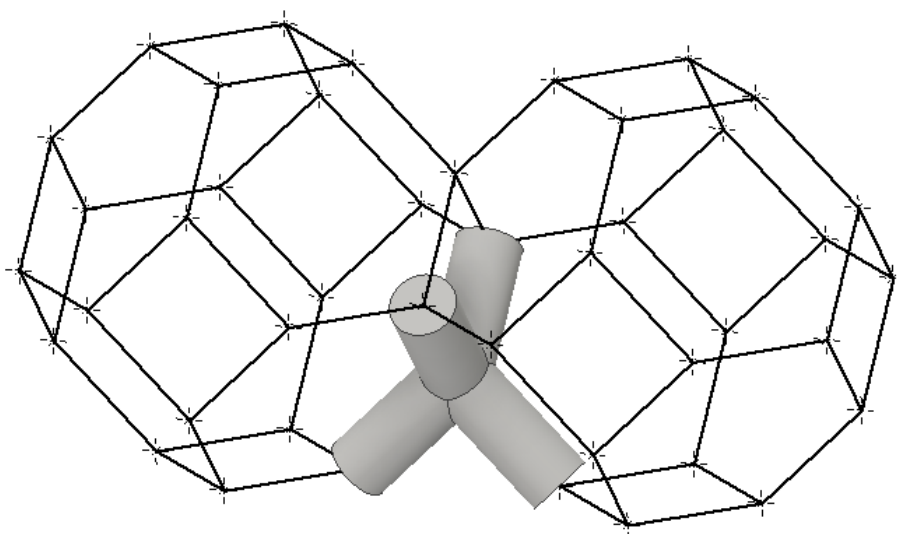


Obr. 6.3 Diskretizace modelu geometrie elementární buňky prutovými prvky.

Diskretizace prutovými prvky však vedla k dalšímu zjednodušení modelu geometrie elementární buňky – tento model geometrie nemusel postihovat některé strukturní vlastnosti oproti modelu geometrie elementární buňky, který byl vytvořen v programu Invenor. Z tohoto důvodu bylo nutné ověřit, zda model geometrie pěnové struktury diskretizovaný objemovými prvky vykazuje totožné chování jako v případě diskretizace prutovými prvky. K tomuto účelu byla provedena analýza deformační odezvy modelu geometrie pěnového materiálu na úrovni trámečků.

6.1.2 SUBSTRUKTURA ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

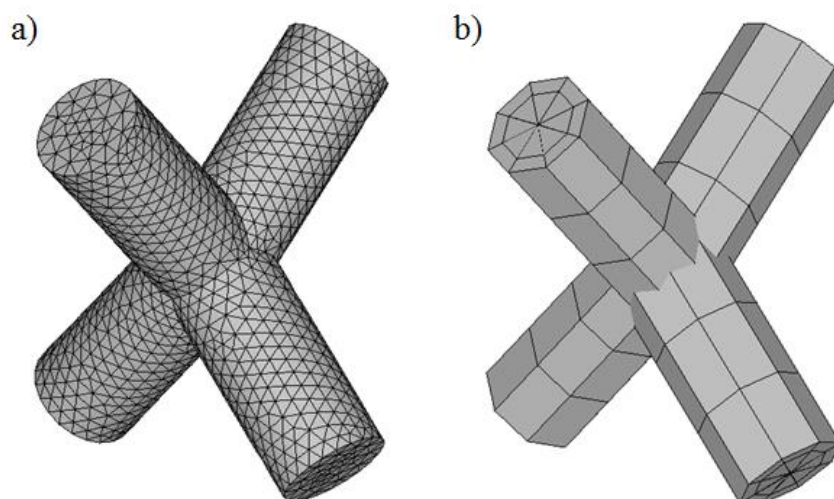
Stejně jako elementární buňka tvoří substrukturu modelu geometrie pěnového materiálu, tak obdobně na úrovni elementární buňky lze nalézt dílčí části, ze kterých je buňka složena. Na obrázku 6.4 je ukázána struktura čtyř trámečků nacházející se mezi dvěma elementárními buňkami s charakteristickými rozměry $H = 0,8$ mm a $D = 0,13$ mm. Tato dílčí část reprezentovala substrukturu elementární buňky, na které byla provedena analýza deformační odezvy při silovém zatížení.



Obr. 6.4 Substruktura elementárních buněk pěnového materiálu.

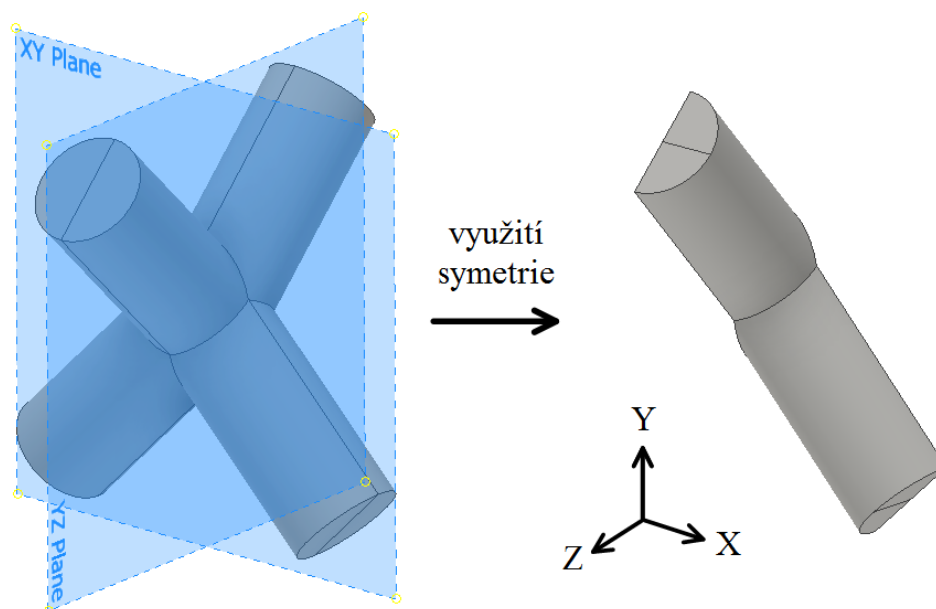
MODEL GEOMETRIE SUBSTRUKTURY ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

Geometrie substruktury elementární buňky se sestávala ze čtyř sbíhajících se trámečků a vycházela z geometrie Kelvinovy buňky. Na obrázku 6.5 je ukázána diskretizace modelu geometrie substruktury elementární buňky objemovými prvky, resp. prutovými prvky.



Obr. 6.5 Model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný a) objemovými a b) prutovými prvky.

V případě modelu geometrie substruktury elementární buňky vytvořeném v programu Inventor bylo při jeho tvorbě využito dvou rovin symetrie (XY a YZ), viz obrázek 6.6. Model geometrie substruktury elementární buňky tak byl pouze čtvrtinový oproti původnímu, což vedlo k výraznému snížení počtu stupňů volnosti při jeho diskretizaci.



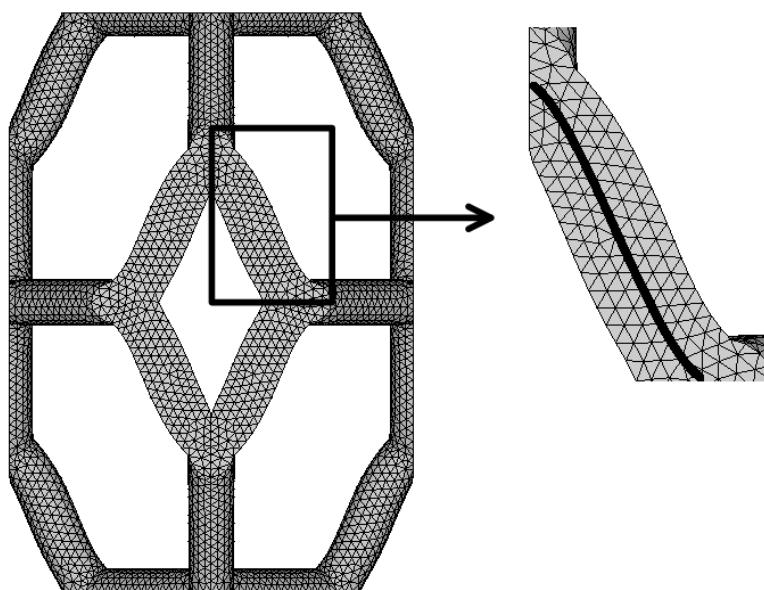
Obr. 6.6 Znáznornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie substruktury elementární buňky vytvořeném v programu Inventor.

MODEL MATERIÁLU SUBSTRUKTURY ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

Model materiálu substruktury elementární buňky byl totožný s modelem materiálu hutné keramiky, viz kapitola Model materiálových vlastností hutného keramického materiálu.

MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZATÍŽENÍ SUBSTRUKTURY ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

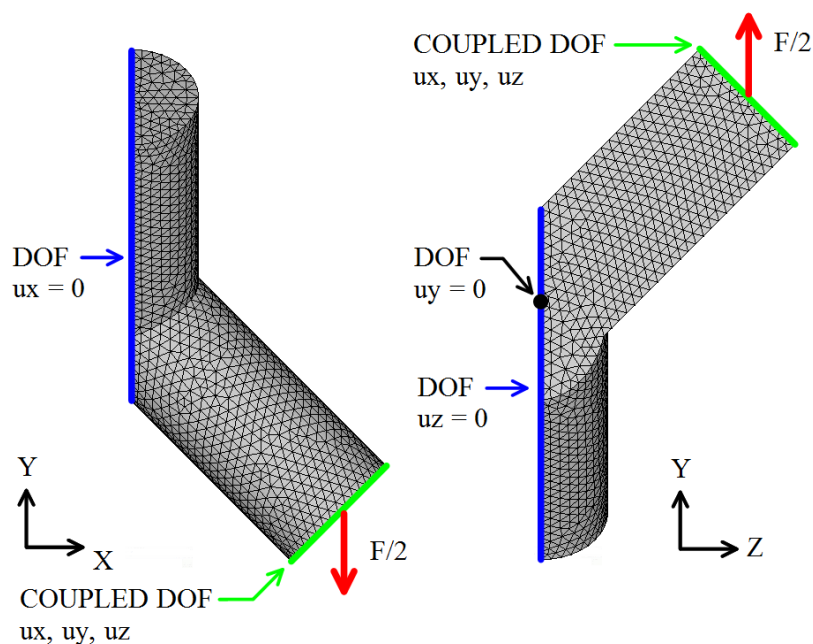
Model okrajových podmínek substruktury elementární buňky byl vytvořen tak, aby věrohodným způsobem vystihoval deformaci trámečku, ke které dochází při namáhání pěnové struktury. Na obrázku 6.7 je ukázána deformace elementární buňky diskretizované objemovými prvky při namáhání tahem. V obrázku je zdůrazněn deformovaný tvar trámečku, který poukazuje na antisymetrický průběh deformace trámečku po jeho střednici. Oblasti sbíhání trámečků tak představují vetknutí, která se sice vůči sobě mohou při namáhání pohybovat, avšak zachovávají nulové natočení.



Obr. 6.7 Antisymetrický tvar deformace trámečku podél jeho střednice.

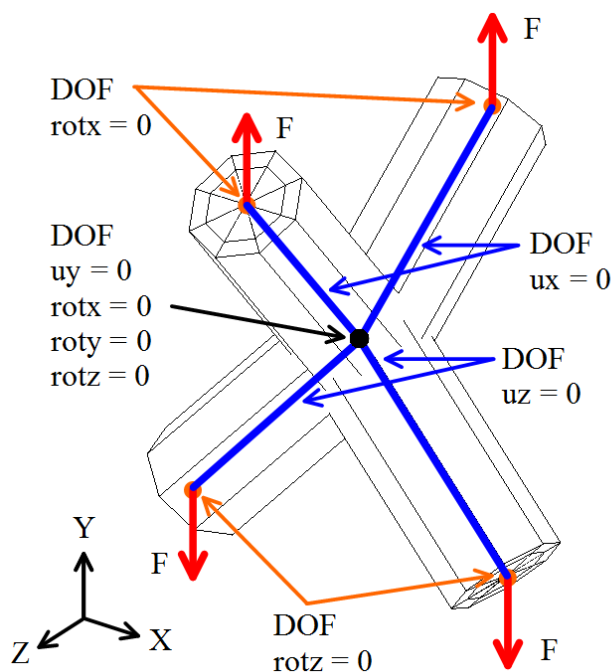
S ohledem na výše uvedený charakter deformace trámečku byl vytvořen model okrajových podmínek pro model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný jak objemovými prvky, tak prutovými prvky.

Okrajové podmínky, které byly aplikovány na model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky, jsou schematicky znázorněny na obrázku 6.8. Uzlům náležícím rovinám symetrie byl zabráněn posuv ve směru kolmém na tyto roviny. Z důvodu jednoznačného určení modelu geometrie substruktury elementární buňky v prostoru byl uzlu ve středu substruktury elementární buňky zabráněn posuv ve směru osy y . Uzlům ležícím na styčné ploše na konci trámečku byly svázány posuvy ve všech osách. V důsledku pak při zatížení posouvající silou zůstal sklon styčné plochy zachován – nedošlo tedy k jejímu natočení.



Obr. 6.8 Schéma okrajových podmínek aplikovaných na model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky.

V případě diskretizace modelu geometrie substruktury elementární buňky prutovými prvky byly okrajové podmínky analogické jako v případě diskretizace objemovými prvky, viz obrázek 6.9. Prutové prvky v porovnání s prvky objemovými obsahují uzly pouze na jejich střednici a kromě tří posuvů jsou definovány navíc třemi rotacemi. Z tohoto důvodu byla v uzlu na konci trámečku zamezena příslušná rotace tak, aby bylo na konci trámečku vynuceno nulové natočení, analogicky jako při diskretizaci objemovými prvky.

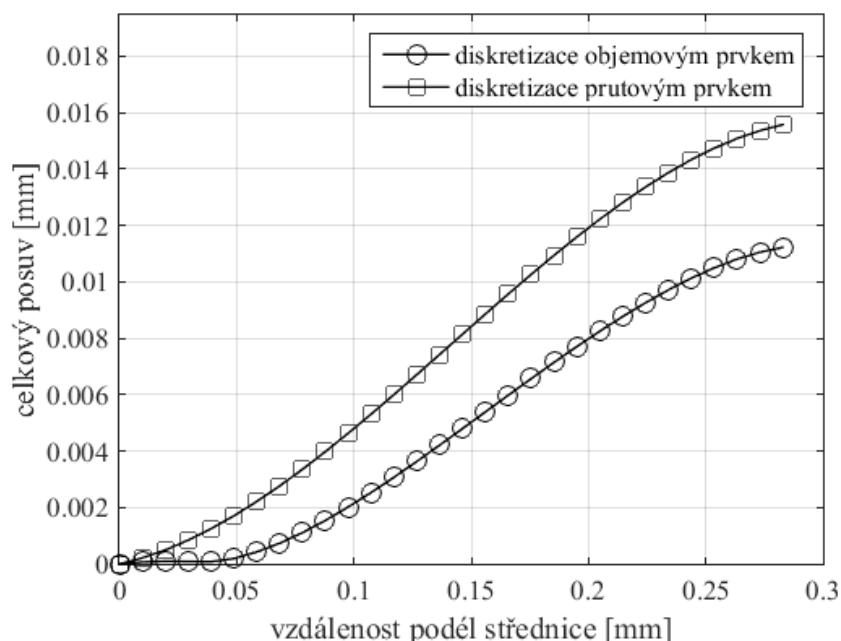


Obr. 6.9 Schéma okrajových podmínek aplikovaných na model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný prutovými prvky.

ANALÝZA DEFORMAČNÍ ODEZVY SUBSTRUKTURY ELEMENTÁRNÍ BUŇKY

Na základě výše uvedených okrajových podmínek a zatížení byla analyzována deformační odezva modelu geometrie substruktury elementární buňky. Následně budou prezentovány celkové posuvy podél střednice trámečku, jemuž odpovídají charakteristické rozměry $D = 0,13$ mm a $L = 0,2828$ mm, resp. pro $H = 0,8$ mm, a pro velikost objemového prvku 0,01 mm. Počet kvadratických prutových prvků neměl na deformaci podél střednice tak významný vliv jako u objemových prvků, zpravidla pro dva a více prutových prvků se průběh deformace prakticky neměnil.

Na obrázku 6.10 je srovnán celkový posuv podél střednice trámečku pro model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky a prutovými prvky.

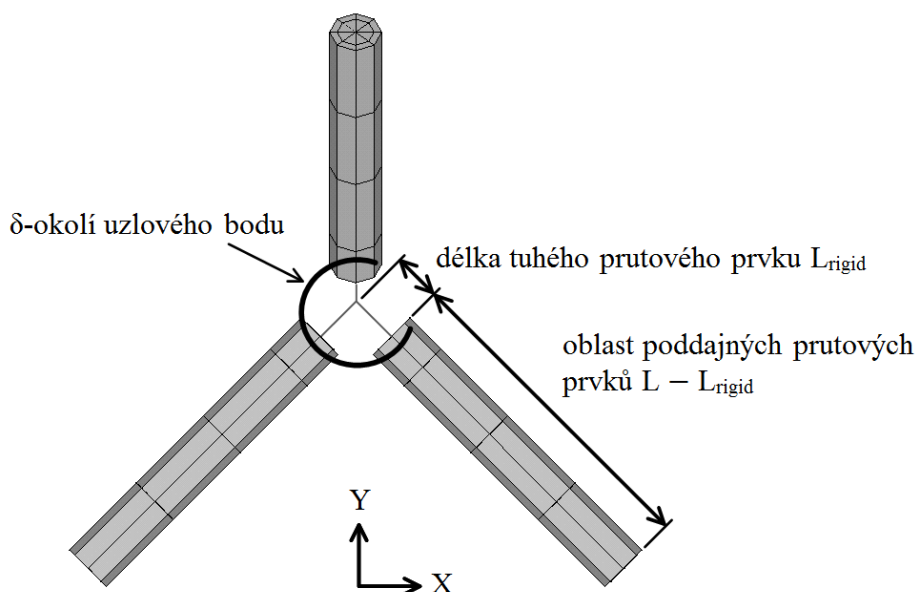


Obr. 6.10 Srovnání celkového posuvu podél střednice trámečku pro model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky a prutovými prvky.

Z obrázku je patrné, že substruktura elementární buňky diskretizovaná objemovými prvky byla významně tužší ve srovnání s případem, kdy byly k tvorbě sítě použity prutové prvky. V blízkém δ -okolí uzlového bodu, kde se sbíhaly trámečky, došlo v případě diskretizace objemovými prvky ke zpevnění, které bylo způsobeno souvislým přechodem trámečků v místě jejich styku. Z obrázku 6.10 je patrné, že toto δ -okolí sahalo do vzdálenosti přibližně 0,05 mm od uzlového bodu. Naopak v případě prutových prvků došlo k deformaci nezávisle na sousedních trámečcích.

Z důvodu vyztužení trámečku charakteristického při diskretizaci objemovými prvky byla oblast δ -okolí uzlového bodu v případě diskretizace prutovými prvky modifikována na tuhý prutový prvek. Za tímto účelem byl využit prvek s označením MPC184-Link/Beam, jehož stupně volnosti jsou definovány na základě okrajových a kinematických podmínek a po jeho délce se nemění [15]. Délka tuhého prutového prvku, který reprezentoval zpevnění trámečku v δ -okolí uzlového bodu, byla označena jako L_{rigid} a pro konkrétní průměr trámečku D a jeho délku L byla určována na základě níže uvedeného algoritmu.

Na obrázku 6.11 je znázorněn trámeček, jehož část byla diskretizována jedním tuhým prutovým a zbylá oblast trámečku byla diskretizována poddajnými prutovými prvky. Pro přehlednost grafického znázornění byl průměr trámečku zmenšen na třetinu.

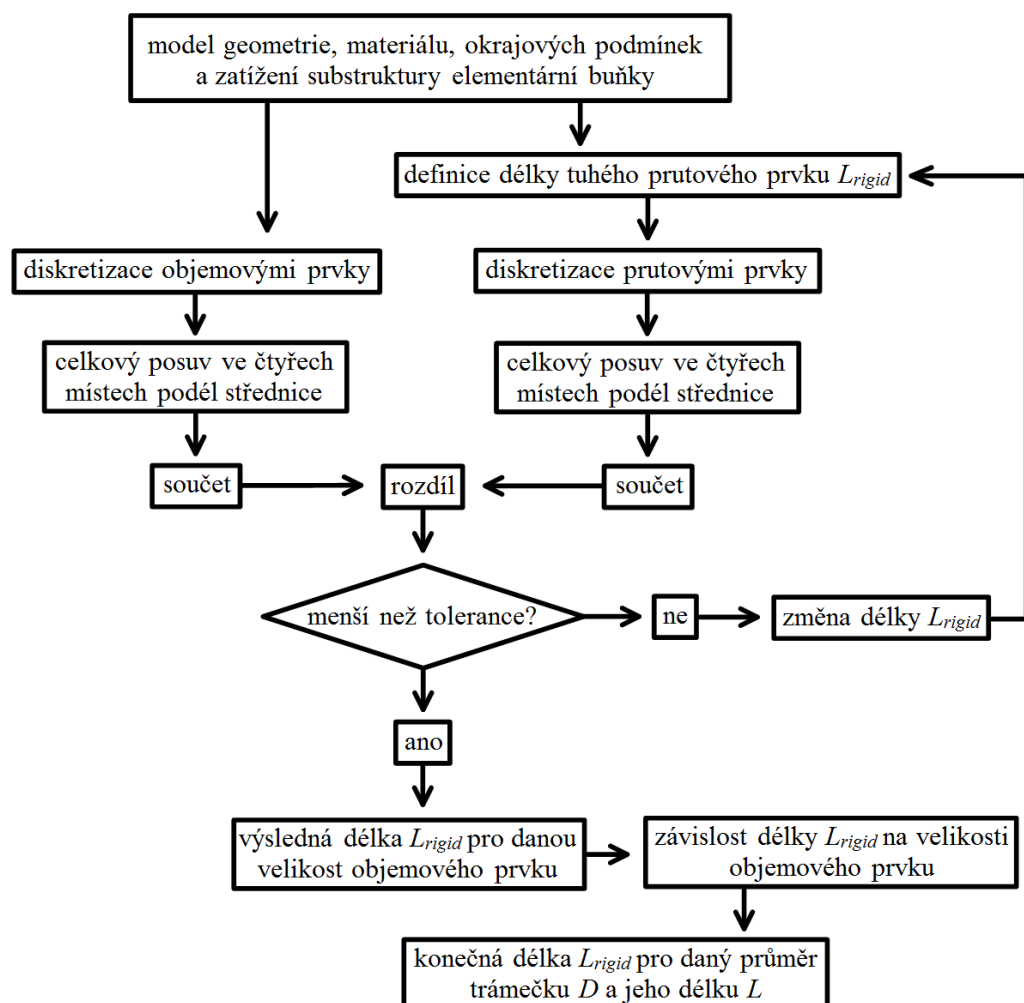


Obr. 6.11 Znázornění části trámečku diskretizované tuhým a poddajným prutovým prvkem.

ALGORITMUS HLEDÁNÍ DÉLKY TUHÉHO PRUTOVÉHO PRVKU

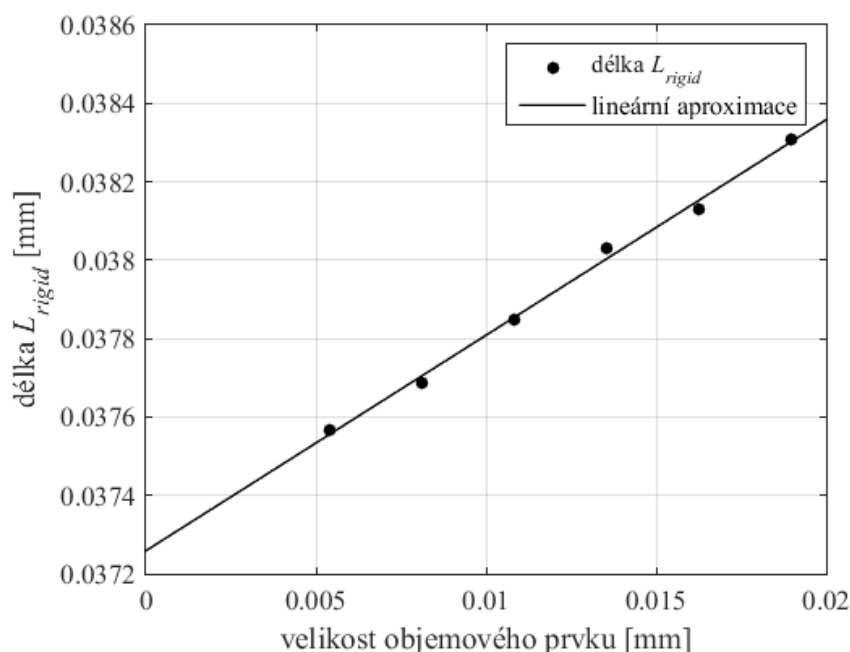
Cílem modifikace diskretizace modelu geometrie substrukтуры elementární buňky prutovými prvky byla co nejlepší shoda deformace trámečku ve srovnání s diskretizací objemovými prvky. Tato podmínka byla splněna pouze pro určitou délku tuhého prutového prvku L_{rigid} , kterou bylo nutné stanovit. Na obrázku 6.12 je znázorněno schéma procesu, který vedl k nalezení délky L_{rigid} pro konkrétní průměr trámečku D a jeho délku L . Vstupem do tohoto procesu byl model geometrie, materiálových vlastností, okrajových podmínek a zatížení substrukтуры elementární buňky.

Při výpočtech byl odečítán celkový posuv ze čtyř uzlů rovnoměrně rozmístěných podél střednice trámečku. Z tohoto důvodu byla oblast trámečku, na které se nacházely poddajné prutové prvky, diskretizována právě čtyřmi těmito prvky tak, jak je to zobrazeno na obrázku 6.11. Čtyři hodnoty celkových posuvů byly sečteny jak v případě diskretizace modelu geometrie substrukтуры elementární buňky objemovými prvky, tak prutovými prvky pro počáteční hodnotu délky L_{rigid} , a porovnány. Pro nalezení délky tuhého prutového prvku byla následně využita metoda půlení intervalů, která představovala iterační proces, během kterého byla postupně modifikována délka L_{rigid} . V každém iteračním kroku byl porovnáván součet celkových posuvů ve čtyřech uzlech pro případ diskretizace substrukтуры elementární buňky objemovými a prutovými prvky. Iterační proces byl zastaven ve chvíli, kdy byl rozdíl součtů celkových posuvů menší než předem zvolená tolerance. Takto byla získána délka tuhého prutového prvku L_{rigid} pro určitou velikost objemových prvků, kterými byla diskretizována substrukтура elementární buňky.



Obr. 6.12 Schéma procesu hledání délky tuhého prutového prvku.

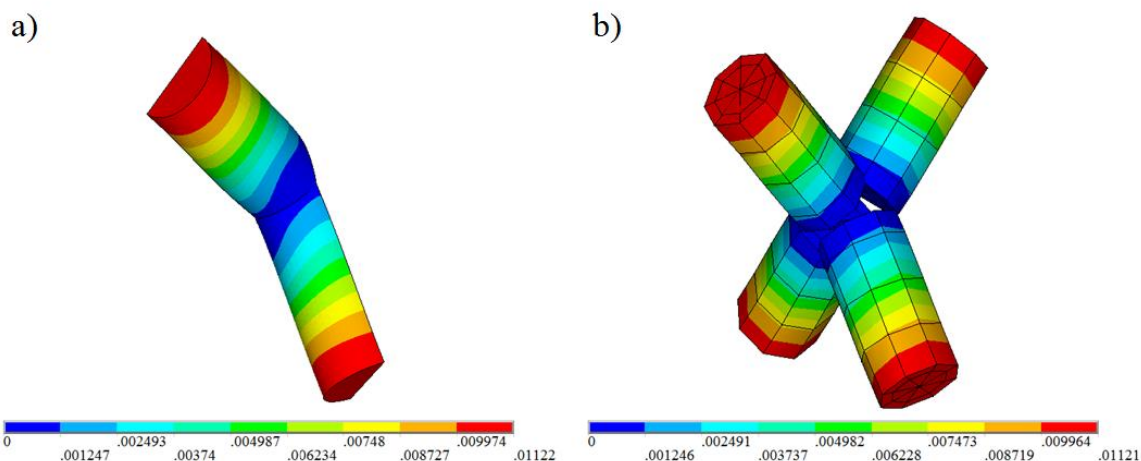
Délka tuhého prutového prvku L_{rigid} závisela na velikosti objemového prvku, kterým byla diskretizována substrukтура elementární buňky, proto byla tato hodnota stanovena vždy pro několik velikostí objemového prvku. Příslušná závislost byla aproximována pomocí přímky, což je ukázáno na obrázku 6.13. Výsledná hodnota délky L_{rigid} byla stanovena z průsečíku lineární aproximace s osou y , resp. z délky L_{rigid} pro teoreticky nulovou velikost objemového prvku. Tato hodnota sloužila jako hlavní vstup při tvorbě modelu geometrie pěnové struktury s modifikovanou diskretizací prutovými prvky. Pro průměr průřezu trámečku $D = 0,13$ mm a $L = 0,2828$ mm byla stanovena výsledná délka $L_{rigid} = 0,0373$ mm.



Obr. 6.13 Závislost délky tuhého prutového prvku na velikosti objemového prvku modelu geometrie substruktury elementární buňky.

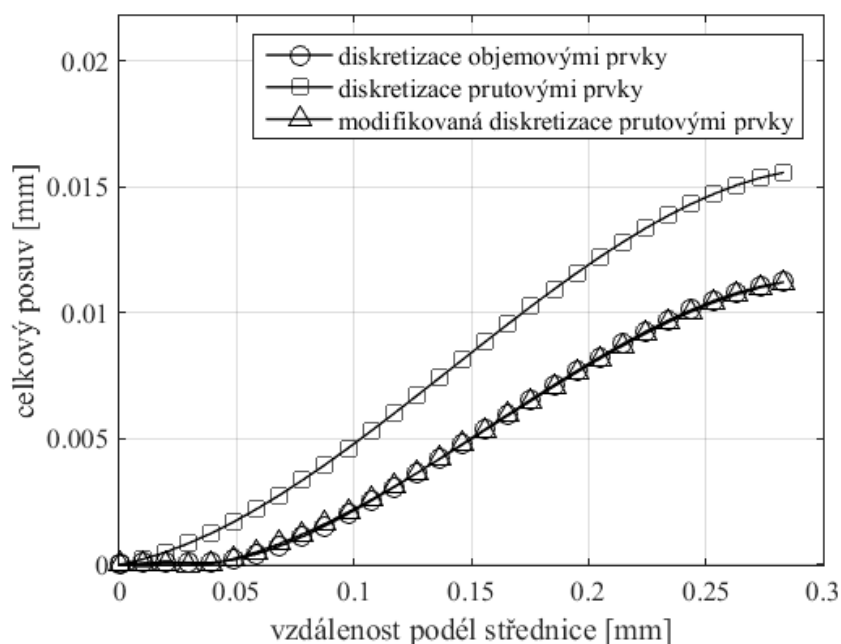
SROVNÁNÍ DEFORMAČNÍ ODEZVY PŘI DISKRETIZACI MODELU GEOMETRIE SUBSTRUKTURY ELEMENTÁRNÍ BUŇKY OBJEMOVÝMI PRVKY S MODIFIKOVANOU DISKRETIZACÍ PRUTOVÝMI PRVKY

V případě substruktury elementární buňky s trámečky o průměru $D = 0,13$ mm a délce $L = 0,2828$ mm byla pro velikost objemového prvku 0,01 mm nalezena velikost tuhého prutového prvku $L_{rigid} = 0,0378$ mm. Na obrázku 6.14 je porovnávána deformace modelu geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaného objemovými prvky s modifikovanou diskretizací prutovými prvky. Srovnání je ukázáno pro celkové posuvy v milimetrech při zatížení silou $F = 10$ N. Z obrázku je patrné, že maximální posuvy substruktury elementární buňky jsou pro příslušné diskretizace prakticky totožné.



Obr. 6.14 Srovnání deformace substruktury elementární buňky diskretizované objemovými prvky s modifikovanou diskretizací prutovými prvky.

Na obrázku 6.15 je prezentováno porovnání celkového posuvu podél střednice trámečku pro všechny varianty diskretizace modelu geometrie substrukтуры elementární buňky. Zahrnutí tuhého prutového prvku při diskretizaci substrukтуры elementární buňky prutovými prvky vedlo téměř k totožnému průběhu deformace trámečku v porovnání s diskretizací objemovými prvky.



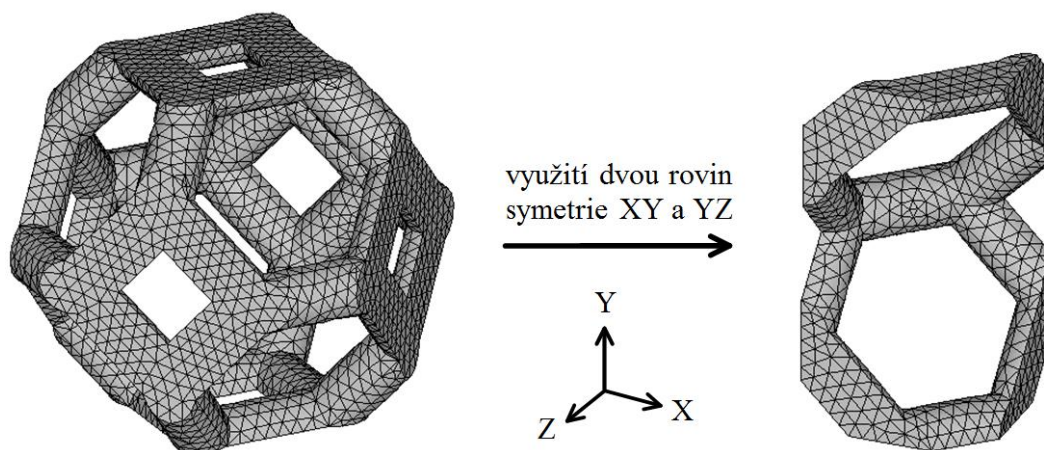
Obr. 6.15 Srovnání celkového posuvu podél střednice trámečku substrukтуры elementární buňky diskretizované objemovými prvky s modifikovanou diskretizací prutovými prvky.

6.1.3 MODEL GEOMETRIE PĚNOVÉ STRUKTURY

MODEL GEOMETRIE PĚNOVÉ STRUKTURY DISKRETIZOVANÝ OBJEMOVÝMI PRVKY

Model geometrie pěnové struktury vytvořený pomocí programu Inventor byl reprezentován jedinou elementární buňkou. Při jeho tvorbě bylo využito dvou rovin symetrie XY a YZ obdobně jako v případě modelu geometrie substrukтуры elementární buňky, viz obrázek 6.16.

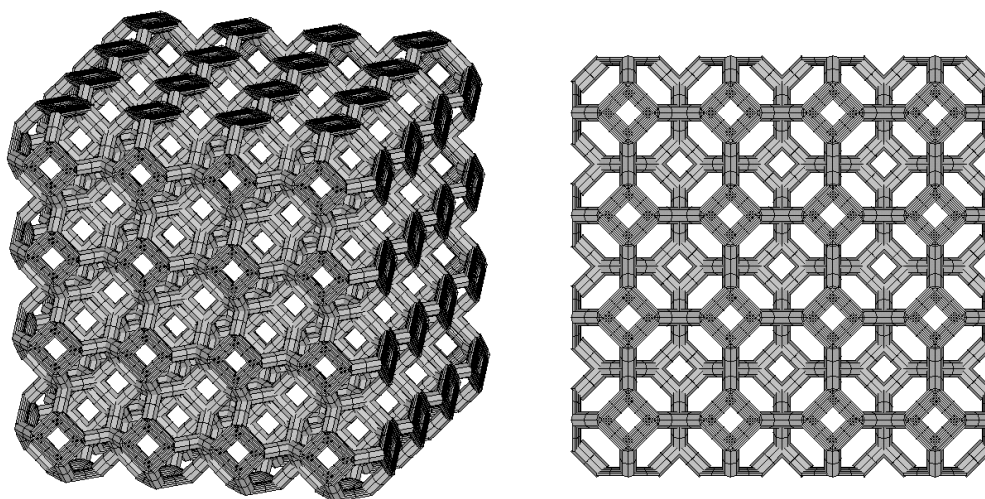
Symetrie modelu geometrie pěnové struktury (diskretizovaného objemovými, resp. prutovými prvky) bylo možné využít pouze v případě namáhání tahem/tlakem. Deformace modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem nevykazovala symetrický charakter.



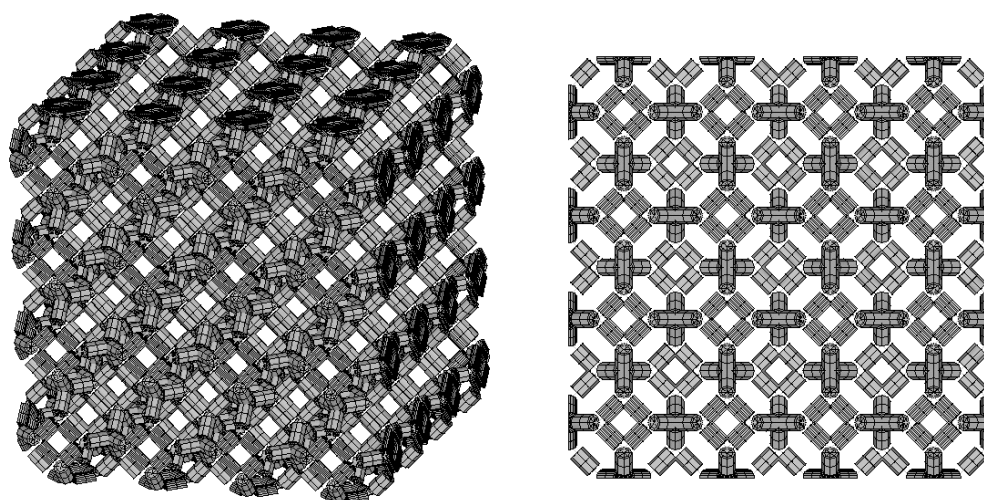
Obr. 6.16 Znáznornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného objemovými prvky.

MODEL GEOMETRIE PĚNOVÉ STRUKTURY DISKRETIZOVANÝ PRUTOVÝMI PRVKY

Při diskretizaci prutovými prvky byl model geometrie pěnové struktury vytvářen kopírováním elementárních buněk do prostoru. Velikost modelu geometrie pěnové struktury byla značena ve tvaru $S_t \times V_t \times T_t$, kde jednotlivé symboly vyjadřovaly šířku, výšku a tloušťku modelu geometrie v počtu elementárních buněk při namáhání tahem/tlakem. V případě namáhání smykem mělo toto značení tvar $S_s \times V_s \times T_s$. Označení velikosti modelu geometrie pěnové struktury pro modifikovanou diskretizaci prutovými prvky bylo totožné. Na obrázku 6.17 je ukázán prostorový pohled a pohled z přední strany na model geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$, který byl diskretizován prutovými prvky. Pro případ modifikované diskretizace prutovými prvky je tento model geometrie pěnové struktury ukázán na obrázku 6.18.

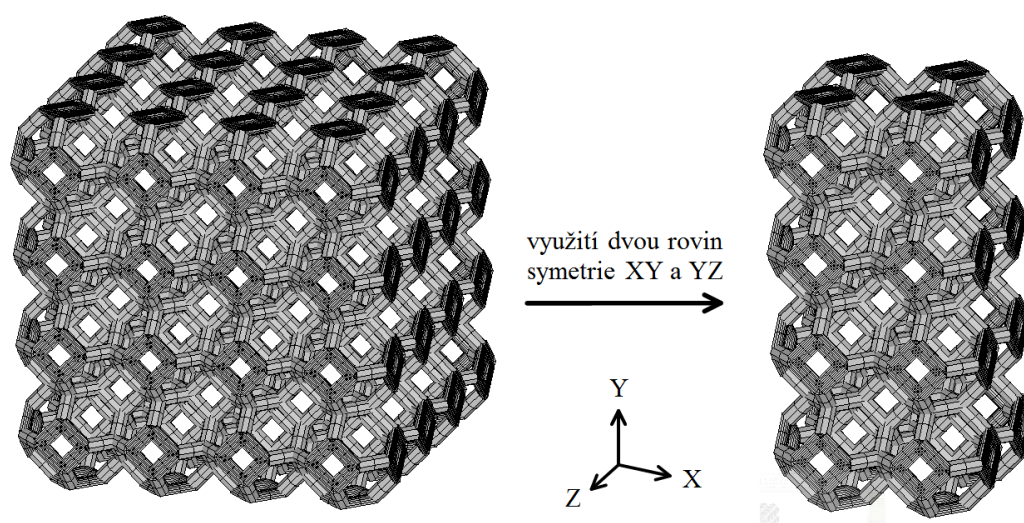


Obr. 6.17 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$ diskretizovaný prutovými prvky.



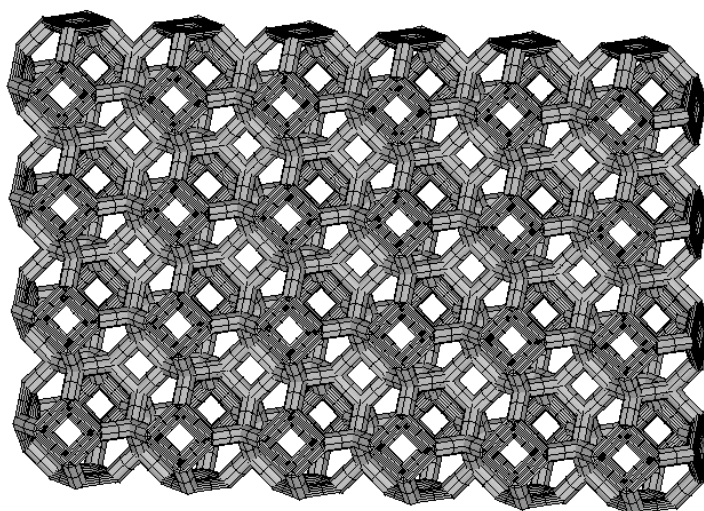
Obr. 6.18 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$ diskretizovaný kombinací tuhého a poddajného prutového prvku.

V případě namáhání tahem/tlakem byly při tvorbě modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky (resp. kombinací tuhého a poddajného prutového prvku) využity roviny symetrie XY a YZ. Především u větších velikostí modelu geometrie pěnové struktury pak docházelo k úspoře výpočtového času. Na obrázku 6.19 je využití rovin symetrie znázorněno na modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$.



Obr. 6.19 Znázornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky.

Při namáhání smykem byl model geometrie pěnové struktury tvořen pouze jednou vrstvou buněk, příkladem může být model geometrie o velikosti $6 \times 4 \times 1$, viz obrázek 6.20.



Obr. 6.20 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $6 \times 4 \times 1$ diskretizovaný prutovými prvky.

6.2 MODEL MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ HUTNÉHO KERAMICKÉHO MATERIÁLU

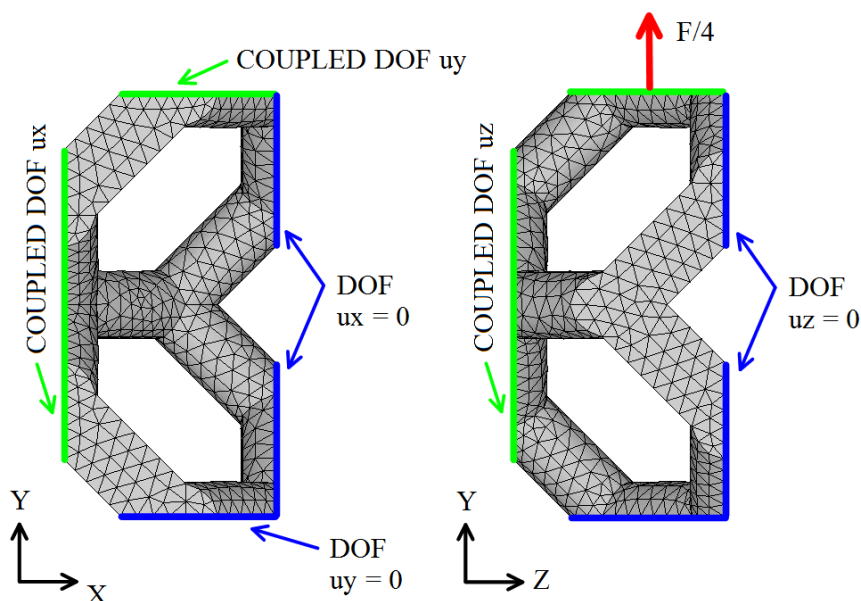
Na základě experimentálních dat uvedených v práci [14] byl v případě trámečků keramické pěnové struktury uvažován lineárně pružný izotropní materiál s následujícími elastickými konstantami:

Youngův modul pružnosti $E_0 = 90 \text{ GPa}$,
Poissonovo číslo $\mu_0 = 0,25$.

6.3 MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZATÍŽENÍ PĚNOVÉ STRUKTURY

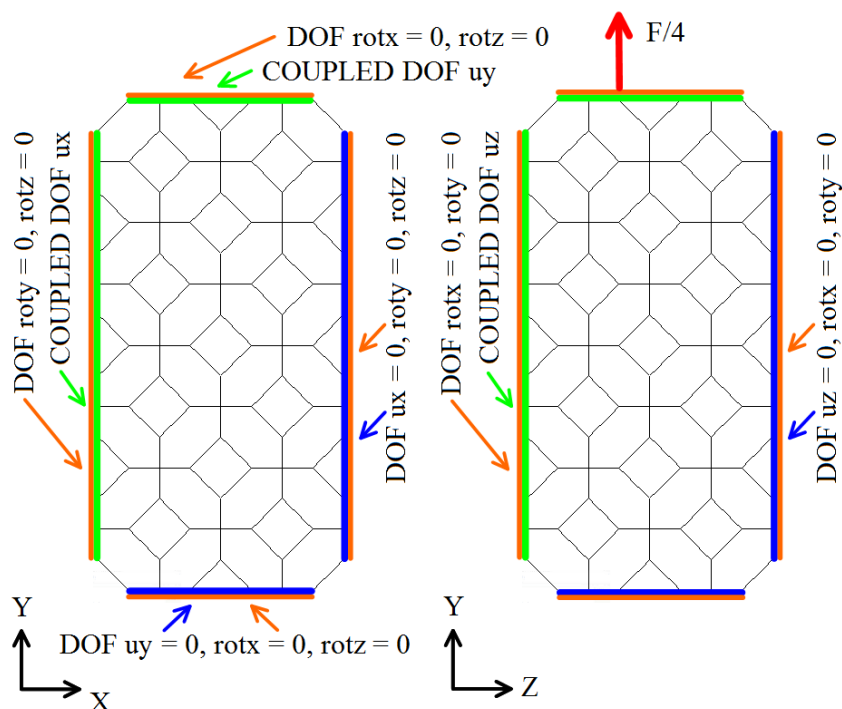
6.3.1 MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZATÍŽENÍ PŘI NAMÁHÁNÍ TAHEM/TLAKEM

Model okrajových podmínek aplikovaný na pěnovou strukturu se lišil v závislosti na typu namáhání. V případě namáhání tahem/tlakem byl charakter okrajových podmínek při diskretizaci modelu geometrie pěnové struktury objemovými a prutovými prvky téměř totožný. Na obrázku 6.21 jsou schematicky znázorněny okrajové podmínky aplikované na model geometrie pěnové struktury diskretizovaný objemovými prvky. Uzlům na spodní stěně modelu geometrie byl předepsán nulový posuv ve směru osy y . V tom samém směru byl uzlům horní stěny svázán posuv, aby byla zátěžná síla rovnoměrně distribuována do všech uzlů této stěny. Uzlům na rovinách symetrie byl předepsán nulový posuv ve směru kolmém na tyto roviny. Na protilehlých stěnách byl uzlům svázán posuv v kolmém směru na tyto stěny, aby byla umožněna kontrakce. Z důvodu využití symetrie modelu geometrie měla síla čtvrtinou velikost vůči celkové, která vstupovala do výpočtu Youngova modulu pružnosti.



Obr. 6.21 Znáznornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného objemovými prvky při namáhání tahem/tlakem.

Na obrázku 6.22 jsou ukázány okrajové podmínky, které byly aplikovány na model geometrie pěnové struktury diskretizovaný prutovými prvky. Navíc byly uzlům ležícím na krajních stěnách tohoto modelu geometrie zamezeny rotace v rovinách kolmých na tyto stěny. Na model geometrie pěnové struktury s modifikovanou diskretizací prutovými prvky byly aplikovány totožné okrajové podmínky.

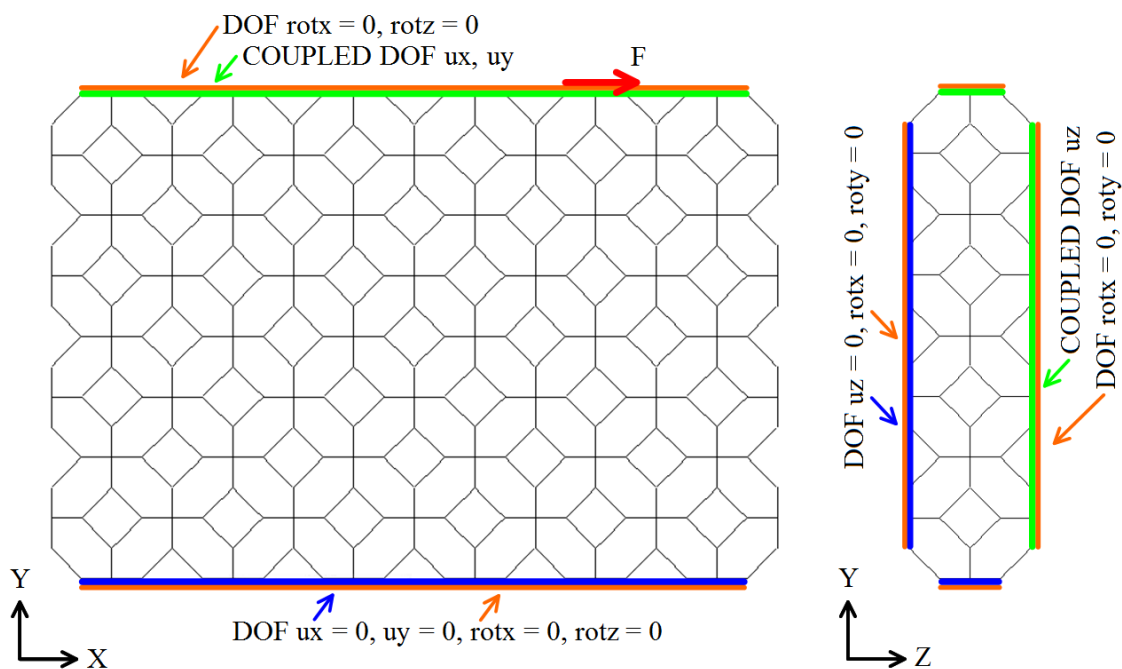


Obr. 6.22 Znáznornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky při namáhání tahem/tlakem.

6.3.2 MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZATÍŽENÍ PŘI NAMÁHÁNÍ SMYKEM

Charakter deformace pěnové struktury při namáhání smykem závisel na velikosti modelu geometrie této struktury. S rostoucí velikostí modelu geometrie pěnové struktury byl více potlačován vliv okrajových podmínek a volných povrchů. Hodnota modulu pružnosti ve smyku pak nebyla tak zkreslena jako v případě menší velikosti modelu geometrie této struktury. Z tohoto důvodu nebyl modul pružnosti ve smyku dohledáván na modelu geometrie pěnové struktury, který byl diskretizován objemovými prvky.

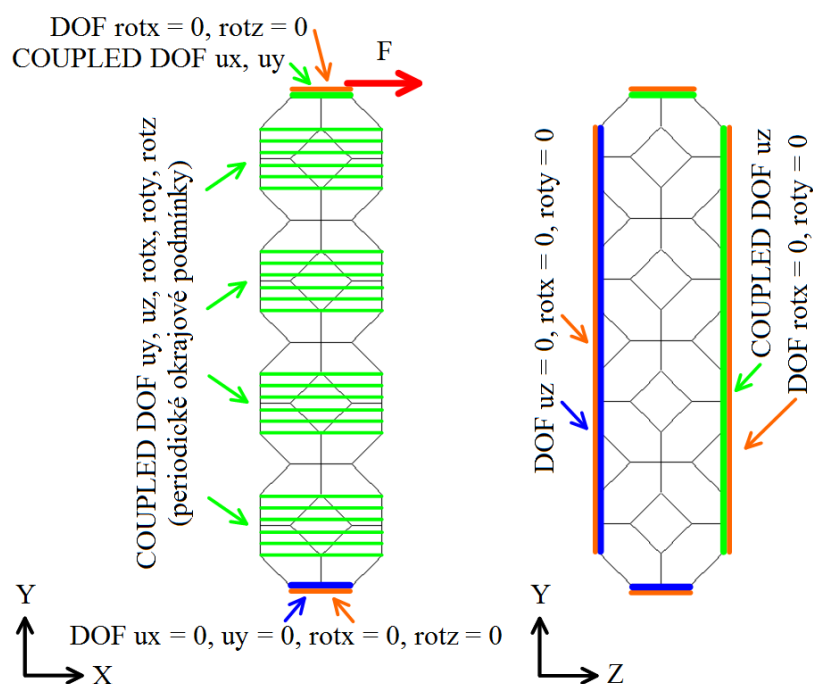
Na obrázku 6.23 jsou schematicky znázorněny okrajové podmínky, které byly aplikovány na model geometrie pěnové struktury při analýze vlivu volných povrchů na modul pružnosti ve smyku. Uzlům ve spodní stěně modelu geometrie byl zamezen posuv ve směru osy x a y . V rovině vrchní stěny bylo předepsáno silové zatížení a uzlům této stěny byly svázány posuvy v ose x a y , aby byla síla rovnoměrně rozložena do všech uzlů. Na jedné z bočních stěn byl zamezen posuv v příčném směru, uzlům druhé boční stěny byl v tomto směru svázán posuv, aby bylo umožněno případné kontrakci. Uzlům na všech stěnách byly zamezeny rotace analogickým způsobem jako při namáhání tahem/tlakem, výjimku tvořily pouze stěny kolmé na směr zatěžující síly.



Obr. 6.23 Znázornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $6 \times 4 \times 1$ diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.

K úplnému potlačení vlivu volných povrchů dochází pouze v případě teoreticky nekonečně širokého modelu geometrie pěnové struktury – při analýze modulu pružnosti ve smyku je pak nutné vytvářet modely geometrie velkých velikostí. Z tohoto důvodu bylo snahou postihnout okrajové podmínky na bočních stěnách kolmých na směr zatížení silou F , které se periodicky opakovaly po šířce modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem. Deformovaný tvar bočních stěn sloupce buněk uprostřed širokého modelu geometrie pěnové struktury byl nejlépe vystižen při svázání jednotlivých dvojic uzlů ležících naproti sobě. Těmito uzly byly svázány všechny stupně volnosti kromě posuvu v ose x , aby nebylo v tomto směru zamezeno případné deformaci mřížky pěny. Na obrázku 6.24 jsou znázorněny periodické okrajové podmínky aplikované na model geometrie pěnové struktury při namáhání

smykem, jehož velikost byla označena ve tvaru $1 \times V_s \times 1$. Kromě periodických okrajových podmínek byly na tento model geometrie pěnové struktury aplikovány totožné okrajové podmínky jako v případě obecného počtu elementárních buněk po šířce pěnové struktury.

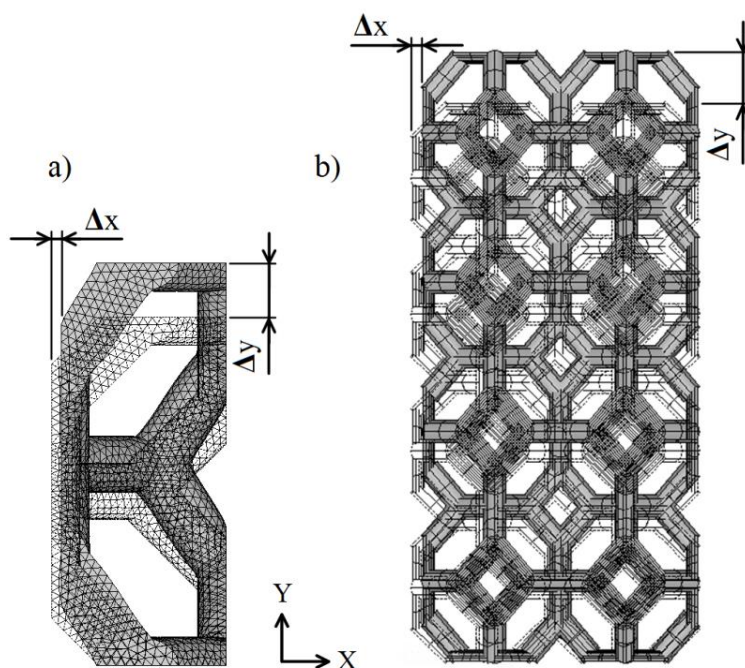


Obr. 6.24 Znáznornění periodických okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $1 \times 4 \times 1$ diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.

7 STANOVENÍ EFEKTIVNÍCH ELASTICKÝCH KONSTANT KERAMICKÉ PĚNOVÉ STRUKTURY

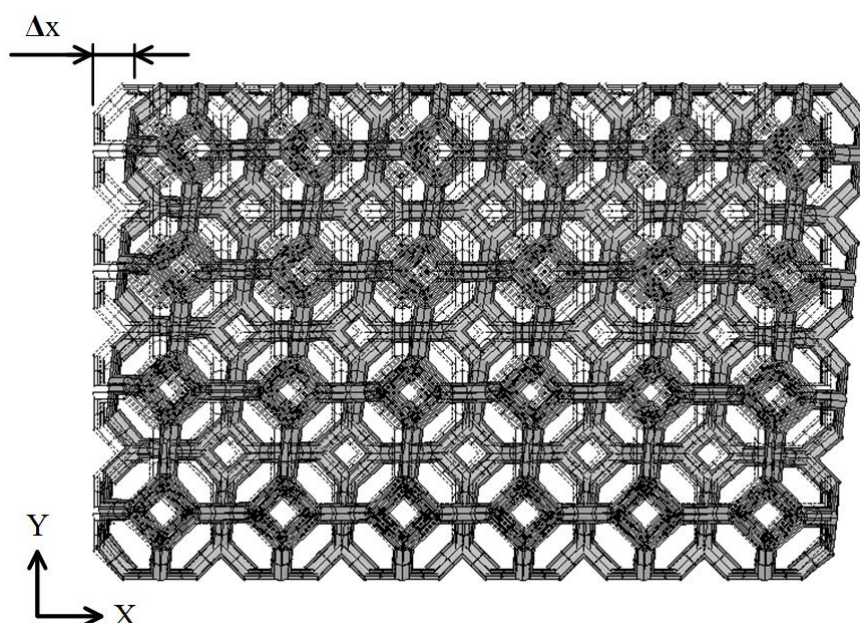
Mechanické vlastnosti pěnové struktury byly určeny na základě dvou typů namáhání. V případě namáhání tahem/tlakem byl stanoven Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo a při namáhání smykem byl stanoven modul pružnosti ve smyku. Vstupem při hledání mechanických vlastností pěnové struktury byla její deformační odezva v závislosti na typu namáhání.

Namáhání tahem/tlakem představovalo tahovou zkoušku, při které byl odečítán posuv ve směru osy y a kontrakce ve směru osy x , viz obrázek 7.1. Na tomto obrázku je znázorněna deformační odezva modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného jak objemovými, tak prutovými prvky (před i po deformaci).



Obr. 7.1 Znázornění deformační odezvy modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného a) objemovými a b) prutovými prvky při namáhání tahem/tlakem.

Na obrázku 7.2 je ukázána deformace modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem. V tomto případě byl odečítán posuv uzlů náležících horní stěně modelu geometrie pěnové struktury ve směru osy x .



Obr. 7.2 Znáznornění deformační odezvy modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.

V tabulce 7.1 je ukázáno, jakým způsobem byly označeny mechanické vlastnosti vztahující se k jednotlivým diskretizacím modelu geometrie pěnové struktury. Pro názornost je toto značení prezentováno na Youngovu modulu pružnosti.

Tab. 7.1 Značení elastických konstant podle typu prvků diskrétní sítě modelu geometrie pěnové struktury.

Diskretizace modelu geometrie pěnové struktury	Značení
Diskretizace objemovými prvky	E_{foam}^{solid}
Diskretizace prutovými prvky	E_{foam}^{beam}
Modifikovaná diskretizace prutovými prvky	$E_{foam}^{modif-beam}$
Obecné označení elastické konstanty pěnové struktury	E_{foam}

Dále bude prezentován způsob stanovení jednotlivých elastických konstant pěnové struktury s obecným označením.

Youngův modul pružnosti byl stanoven na základě Hookova zákona pro jednoosou napjatost z podílu normálového napětí σ_y a podélného přetvoření ε_y [16]:

$$E_{foam} = \frac{\sigma_y}{\varepsilon_y} = \frac{\frac{F}{(S_t \cdot H) \cdot (T_t \cdot H)}}{\frac{\Delta y}{(V_t \cdot H)}}, \quad (6)$$

kde písmenem F bylo označeno zatížení modelu geometrie pěnové struktury tahovou silou v [N], která působila na efektivní plochu o velikosti $(S_t \cdot H) \cdot (T_t \cdot H)$ v [mm²], člen Δy (obrázek 7.1) vyjadřoval deformaci pěnové struktury ve směru osy y v [mm] a $(V_t \cdot H)$ byl její původní rozměr v [mm] ve směru zatížení.

Poissonovo číslo bylo určeno jako poměr příčného přetvoření ε_x a podélného přetvoření ε_y ze vztahu [16]:

$$\mu_{foam} = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{\frac{\Delta x}{(S_t/2 \cdot H)}}{\frac{\Delta y}{(V_t \cdot H)}}, \quad (7)$$

kde parametr Δx (obrázek 7.1) označoval příčnou deformaci v [mm] a člen $(S_t/2 \cdot H)$ velikost modelu geometrie pěnové struktury v [mm] v příčném směru při využití symetrie.

Modul pružnosti ve smyku byl stanoven na základě podílu smykového napětí τ_{xy} a úhlového přetvoření γ_{xy} [16]:

$$G_{foam} = \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}} = \frac{\frac{F}{(S_s \cdot H^2)}}{\frac{\Delta x}{(V_s \cdot H)}}, \quad (8)$$

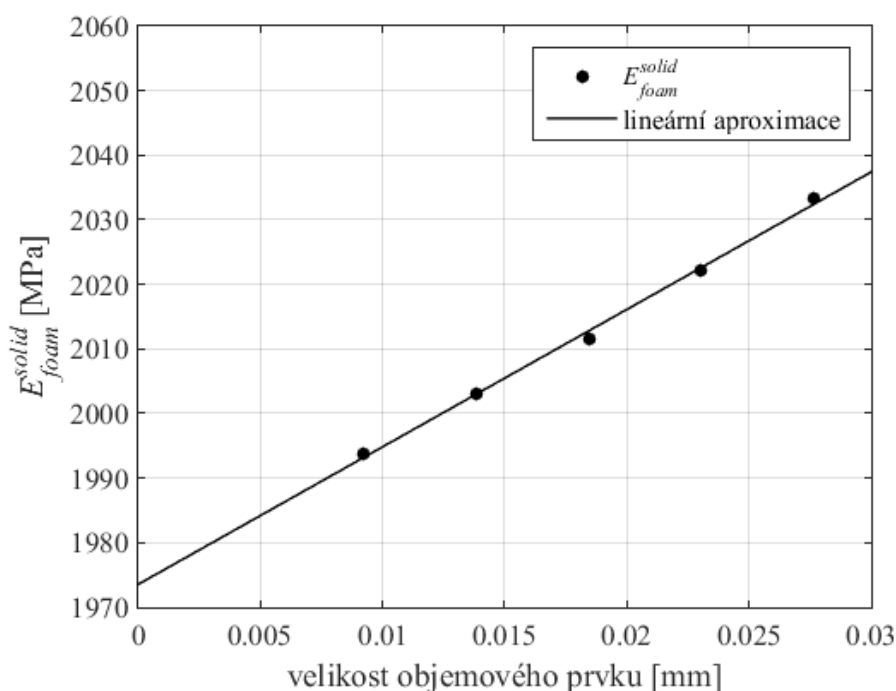
kde F byla smyková síla působící ve vrchní stěně modelu geometrie pěnové struktury v [N], člen $(S_s \cdot H^2)$ vyjadřoval velikost efektivní plochy vrchní stěny v [mm²], parametr Δx (obrázek 7.2) vyjadřoval posuv uzlů této stěny ve směru zatížení v [mm] a člen $(V_s \cdot H)$ označoval velikost modelu geometrie v [mm] ve směru osy y. V případě modelu geometrie pěnové struktury s periodickými okrajovými podmínkami byl člen S_s roven jedné.

8 PREZENTACE A ANALÝZA VÝSLEDKŮ

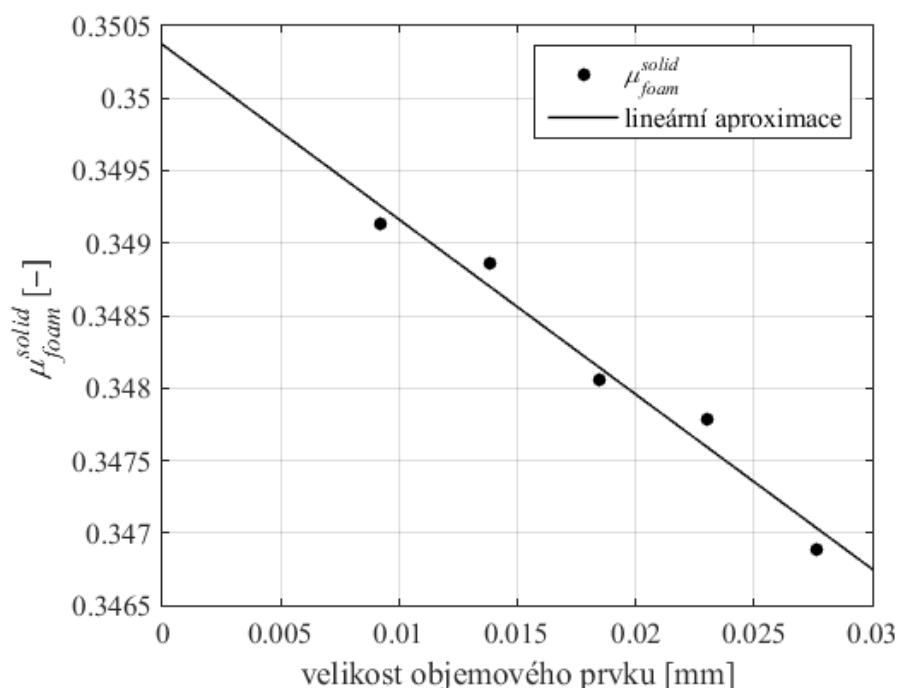
8.1 PRŮBĚH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI MODELU GEOMETRIE PĚNOVÉ STRUKTURY

Analýza závislosti mechanických vlastností pěnové struktury na velikosti modelu geometrie bude prezentována pro pórovitost pěnové struktury $P = 85\%$ a elementární buňku o velikosti $H = 0,8$ mm, resp. pro $D = 0,13$ mm a $L = 0,2828$ mm. Vliv velikosti modelu geometrie pěnové struktury na její mechanické vlastnosti byl analyzován pouze pro diskretizaci prutovými prvky, v případě diskretizace objemovými prvky byly mechanické vlastnosti hledány na jedné elementární buňce. V případě diskretizace poddajnými prutovými prvky a v případě modifikované varianty byl průběh výše zmíněné závislosti analogický, z tohoto důvodu bude tato závislost prezentována pouze pro modifikovanou diskretizaci prutovými prvky s délkou $L_{rigid} = 0,0373$ mm.

Mechanické vlastnosti závisely rovněž na hustotě sítě konečných prvků, kterými byl diskretizován model geometrie pěnové struktury. V případě diskretizace objemovými prvky byl pokaždé proveden rozbor závislosti mechanických vlastností na velikosti prvku. Na obrázku 8.1 je tato závislost ukázána pro Youngův modul pružnosti a na obrázku 8.2 pro Poissonovo číslo. Získané hodnoty byly aproximovány přímkou a výsledná hodnota byla získána z průsečíku této přímky s osou elastické konstanty.



Obr. 8.1 Závislost Youngova modulu pružnosti E_{foam}^{solid} na velikosti objemového prvku.



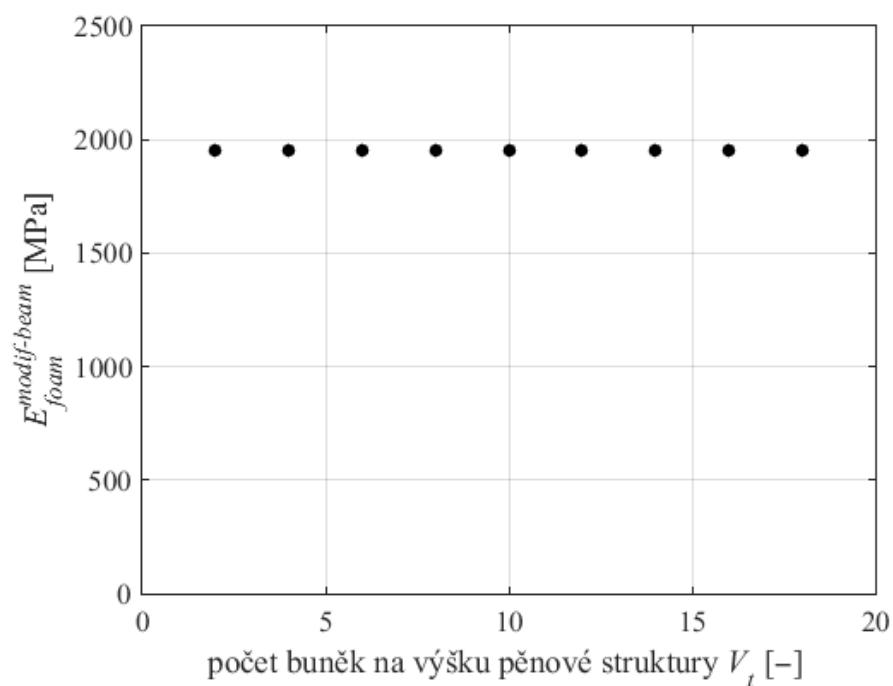
Obr. 8.2 Závislost Poissonova čísla μ_{foam}^{solid} na velikosti objemového prvku.

V případě obou diskretizací modelu geometrie pěnové struktury prutovými prvky se mechanické vlastnosti od určitého počtu prutových prvků na trámeček prakticky neměnily. Při hledání Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla se ukázala jako dostačující diskretizace trámečku dvěma prutovými prvky. Modul pružnosti ve smyku byl ovlivněn hustotou diskrétní sítě především v případě větších velikostí modelu geometrie pěnové struktury. U těchto modelů geometrie bylo nutné pomocí většího počtu prvků postihnout přechodovou oblast ovlivněnou okrajovými podmínkami. Trámečky pak byly diskretizovány třemi až pěti prutovými prvky.

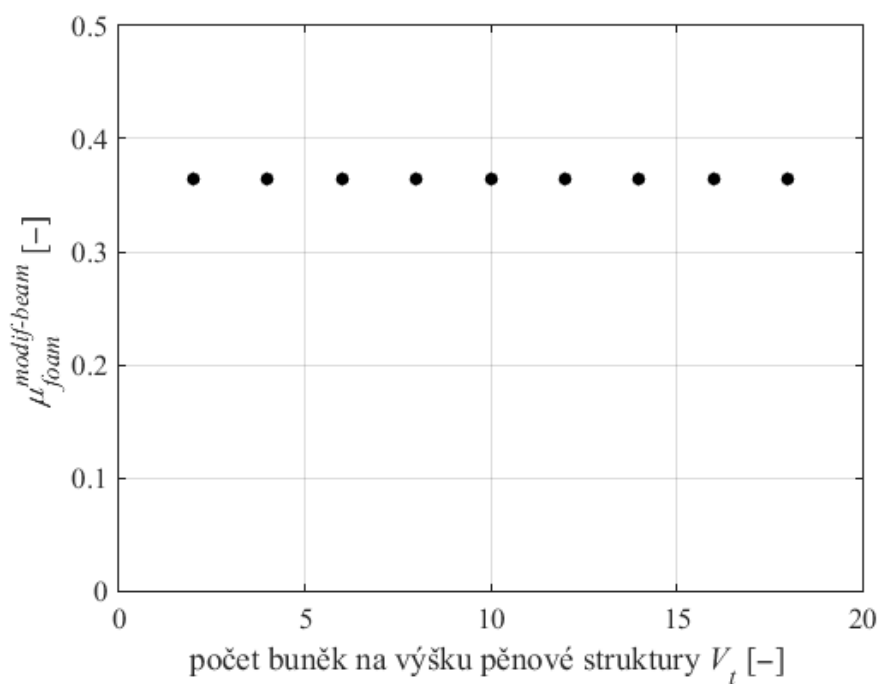
8.1.1 YOUNGŮV MODUL PRUŽNOSTI A POISSONOVO ČÍSLO

V případě namáhání tahem/tlakem byl hledán Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo při využití symetrie modelu geometrie pěnové struktury, čímž bylo docíleno významného snížení počtu stupňů volnosti. Závislost Youngova modulu pružnosti na velikosti modelu geometrie pěnové struktury do dvaceti elementárních buněk na jeho stranu je ukázána na obrázku 8.3 a pro Poissonovo číslo na obrázku 8.4.

Z obrázků vyplývá, že Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo nezávisí na velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem. Veškeré dále prezentované výsledné hodnoty elastických konstant souvisejících s namáháním tahem/tlakem byly stanoveny na modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$.



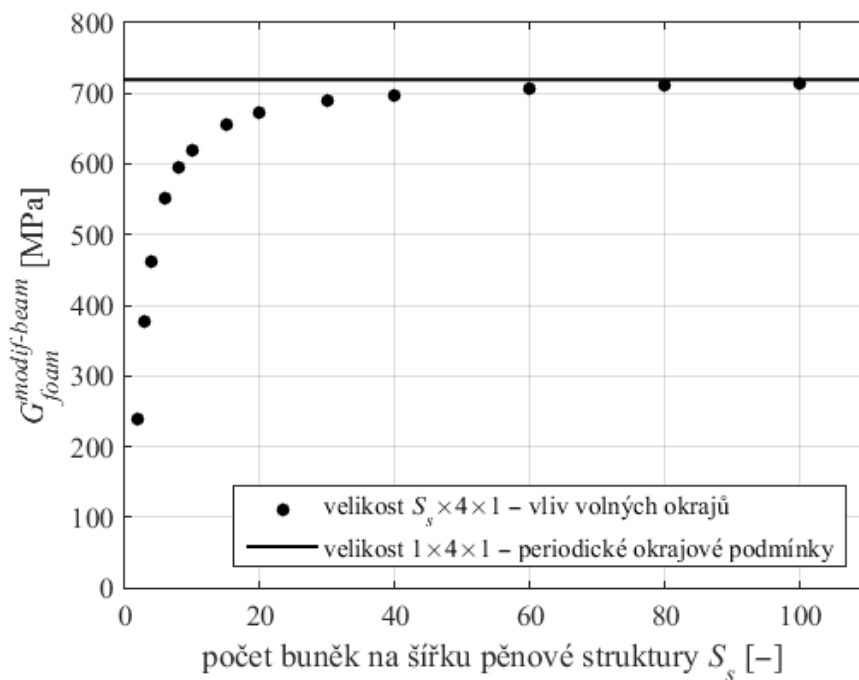
Obr. 8.3 Závislost Youngova modulu pružnosti $E_{foam}^{modif-beam}$ na velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem.



Obr. 8.4 Závislost Poissonova čísla $\mu_{foam}^{modif-beam}$ na velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem.

8.1.2 MODUL PRUŽNOSTI VE SMYKU

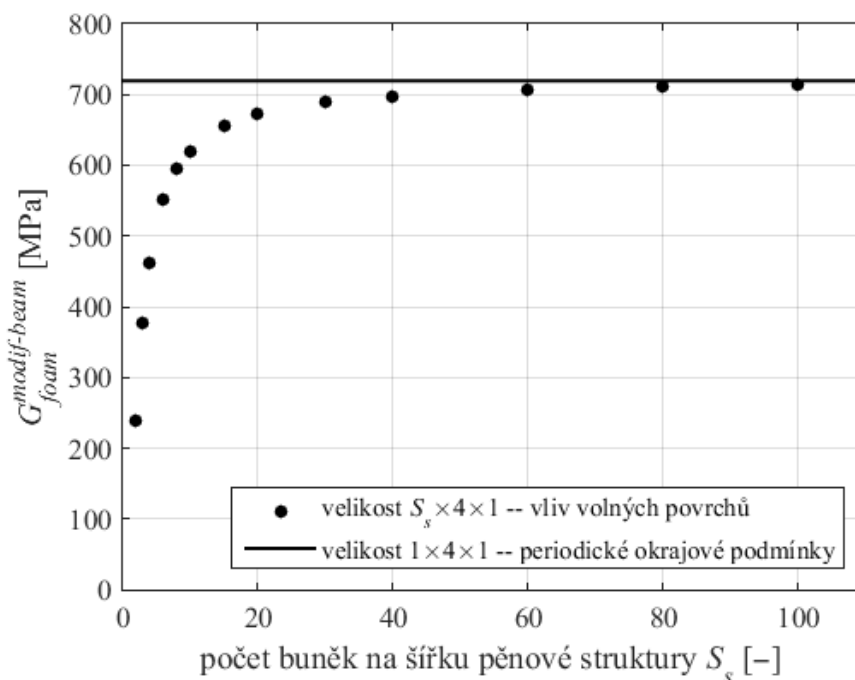
Proces určování modulu pružnosti ve smyku se sestával ze dvou částí. Nejprve byl analyzován vliv volných povrchů na modelu geometrie pěnové struktury s konstantním počtem elementárních buněk na výšku. K tomuto účelu byl zvolen model geometrie se čtyřmi elementárními buňkami na výšku pěnové struktury. Na obrázku 8.5 je ukázána závislost modulu pružnosti ve smyku na počtu elementárních buněk po šířce modelu geometrie pěnové struktury s konstantním počtem elementárních buněk na výšku.



Obr. 8.5 Průběh modulu pružnosti ve smyku v závislosti na počtu elementárních buněk na šířku modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $S_s \times 4 \times 1$.

Z obrázku vyplývá, že modul pružnosti ve smyku s rostoucím počtem buněk na šířku pěnové struktury konvergoval k modulu pružnosti ve smyku stanoveném na modelu geometrie s okrajovými podmínkami, u kterých dochází k eliminaci vlivu volných povrchů.

Druhou částí byla analýza vlivu okrajových podmínek na modul pružnosti ve smyku s rostoucím počtem elementárních buněk na výšku modelu geometrie pěnové struktury. V případě aplikace periodických okrajových podmínek na model geometrie pěnové struktury mohl být tento vliv analyzován na jednom sloupci elementárních buněk, což vedlo k významné úspoře výpočtového času. Na obrázku 8.6 je znázorněn průběh modulu pružnosti ve smyku v závislosti na počtu elementárních buněk na výšku modelu geometrie pěnové struktury s periodickými okrajovými podmínkami. Z obrázku je patrný významný vliv okrajových podmínek pro malé velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem. Pro velké velikosti modelu geometrie pěnové struktury modul pružnosti ve smyku konvergoval k teoretické hodnotě $G_{foam-teoret}^{modif-beam}$, která nebyla ovlivněna okrajovými podmínkami.



Obr. 8.6 Průběh modulu pružnosti ve smyku v závislosti na počtu elementárních buněk na výšku modelu geometrie pěnové struktury s periodickými okrajovými podmínkami.

Zároveň bylo snahou průběh modulu pružnosti ve smyku z výše uvedeného obrázku aproximovat analytickou funkcí, která vedla k určení hodnoty $G_{foam-teoret}^{modif-beam}$. Jako nejvhodnější se pro tento účel ukázal popis pomocí hyperboly ve tvaru:

$$G_{foam}^{modif-beam} = G_{foam-teoret}^{modif-beam} + \frac{C}{V_s}, \quad (9)$$

kde konstanta C zahrnovala vliv velikosti modelu geometrie pěnové struktury a $G_{foam-teoret}^{modif-beam}$ vyjadřovala hodnotu modulu pružnosti ve smyku pro nekonečně velký model geometrie pěnové struktury. Nejlépe byla závislost modulu pružnosti ve smyku popsána hyperbolou (9), pokud byly konstanty $G_{foam-teoret}^{modif-beam}$ a C dohledány z velikosti modelu geometrie pěnové struktury $1 \times 8 \times 1$ a $1 \times 40 \times 1$. Dále prezentované výsledné hodnoty modulu pružnosti ve smyku pěnové struktury byly stanoveny totožným způsobem jako hodnota $G_{foam-teoret}^{modif-beam}$.

8.2 ZÁVISLOST MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PĚNOVÉ STRUKTURY NA PÓROVITOSTI

Pórovitost je důležitou strukturní vlastností, která významným způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti keramického pěnového materiálu. Charakteristické rozměry elementární buňky jednoznačně definují pórovitost pěnové struktury, z tohoto důvodu byly mechanické vlastnosti analyzovány v závislosti na průměru trámečku D a jeho délce L . Elastické konstanty pěnového materiálu byly pro konkrétní hodnoty D a L interpolovány pomocí kubického splajnu v programu MATLAB a budou zde prezentovány jako spojitě průběhy.

8.2.1 PRŮBĚH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PĚNOVÉ STRUKTURY PŘI ZACHOVÁNÍ POMĚRU D/L

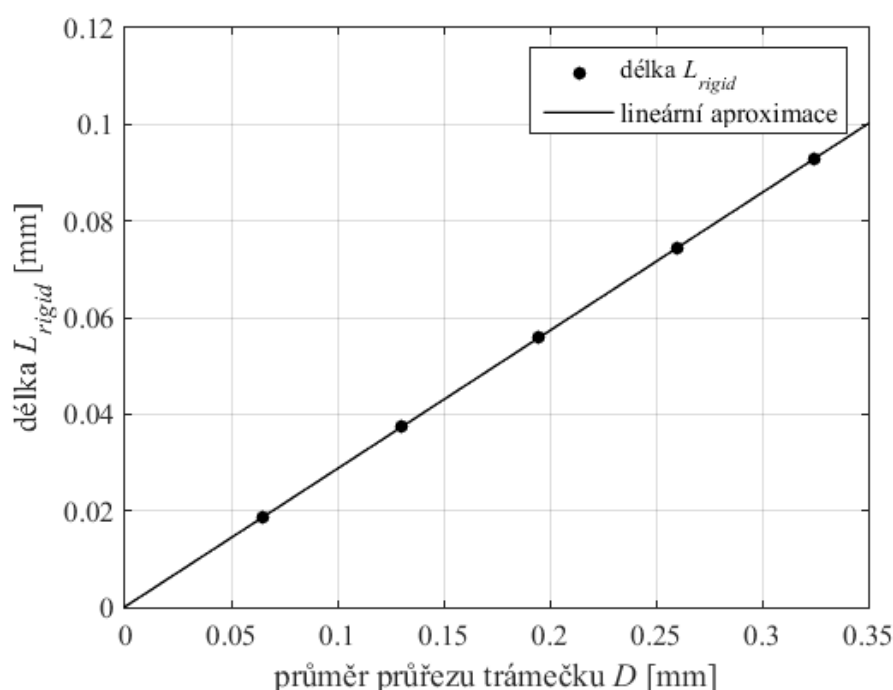
V této kapitole bude prezentována nezávislost efektivních elastických konstant pěnové struktury na průměru trámečku D a jeho délce L při zachování poměru těchto dvou parametrů. V opačném případě by musely být elastické konstanty pěnového materiálu stanoveny pro všechny kombinace průměru trámečku D a jeho délky L .

V tabulce 8.1 jsou ukázány čtyři varianty parametrů D a L , u kterých byly hledány mechanické vlastnosti při konstantním poměru D/L . Jednotlivé hodnoty představovaly násobky charakteristických rozměrů elementární buňky s velikostí $H = 0,8$ mm a pórovitostí $P = 85$ %.

Tab. 8.1 Varianty parametrů D a L pro analýzu mechanických vlastností pěnové struktury při zachování poměru D/L .

	Konstantní poměr $D/L = 0,46$			
D [mm]	0,065	0,13	0,195	0,26
L [mm]	0,1414	0,2828	0,4242	0,5656

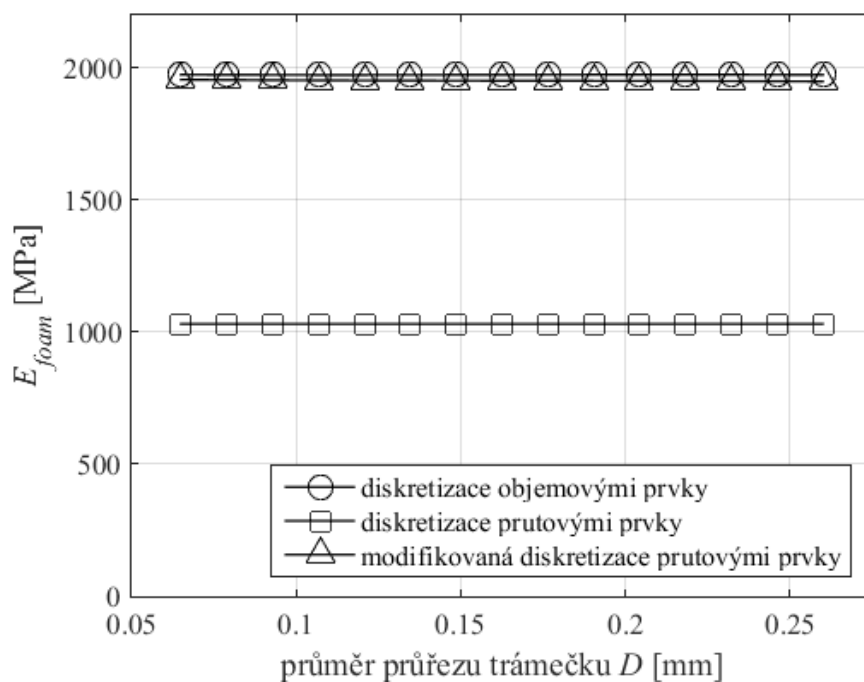
Pro výše uvedené kombinace charakteristických rozměrů D a L byla nalezena odpovídající délka tuhého prutového prvku L_{rigid} , která se v případě zachování poměru D/L měnila. Na obrázku 8.7 je ukázána závislost délky tuhého prutového prvku na velikosti průměru trámečku D pro konstantní poměr D/L rozšířená navíc o hodnotu $D = 0,325$ mm. V případě závislosti délky L_{rigid} na délce trámečku L byl získán totožný průběh. Při zachování poměru D/L se ukázal vztah mezi charakteristickými rozměry elementární buňky a délkou tuhého prutového prvku jako lineární.



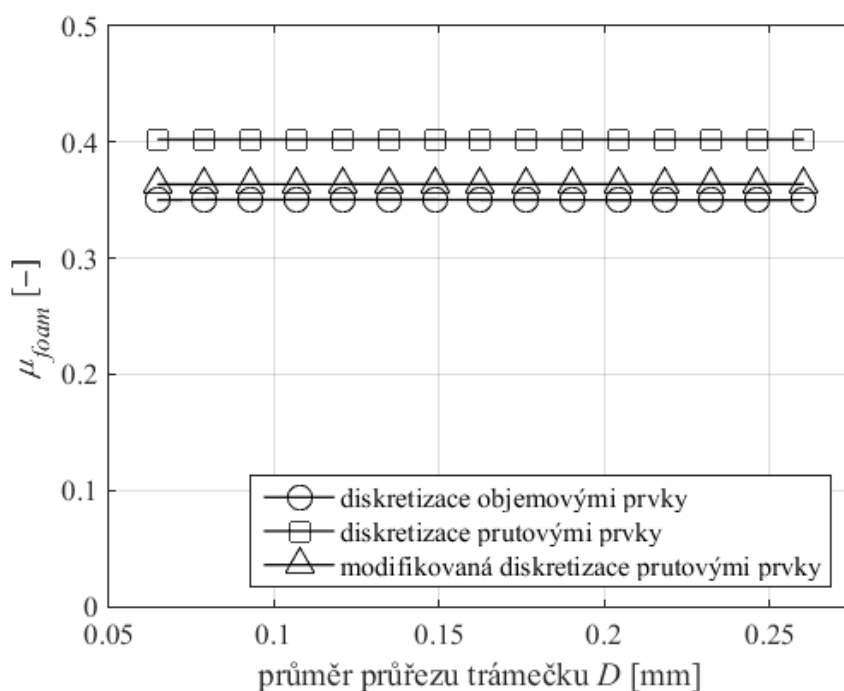
Obr. 8.7 Závislost délky L_{rigid} na průměru trámečku D pro konstantní poměr D/L .

S ohledem na závislost uvedenou na obrázku výše lze pro libovolný parametr D , resp. L , nalézt odpovídající délku L_{rigid} na základě stanovené (a tedy známé) délky L_{rigid} pro určitý průměr trámečku D , resp. jeho délku L . A v případě stanovení obecné závislosti délky L_{rigid} na poměru D/L pak lze tuto délku L_{rigid} určit pro libovolnou pórovitost pěnové struktury s konkrétními parametry D a L .

Na základě známých délek tuhého prutového prvku pro kombinace D a L uvedené v tabulce 8.1 bylo možné porovnat mechanické vlastnosti pěnové struktury pro všechny diskretizace modelu geometrie. Na obrázku 8.8 je toto srovnání uvedeno pro Youngův modul pružnosti a na obrázku 8.9 pro Poissonovo číslo. Z těchto závislostí vyplývá, že mechanické vlastnosti pěnové struktury nejsou závislé na charakteristických rozměrech D a L při zachování poměru těchto parametrů, tzn. při zachování pórovitosti pěnové struktury. Z tohoto důvodu budou veškeré elastické konstanty pěnové struktury prezentovány v závislosti na poměru D/L .



Obr. 8.8 Srovnání Youngova modulu pružnosti pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury při zachování poměru D/L .



Obr. 8.9 Porovnání Poissonova čísla pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury při zachování poměru D/L .

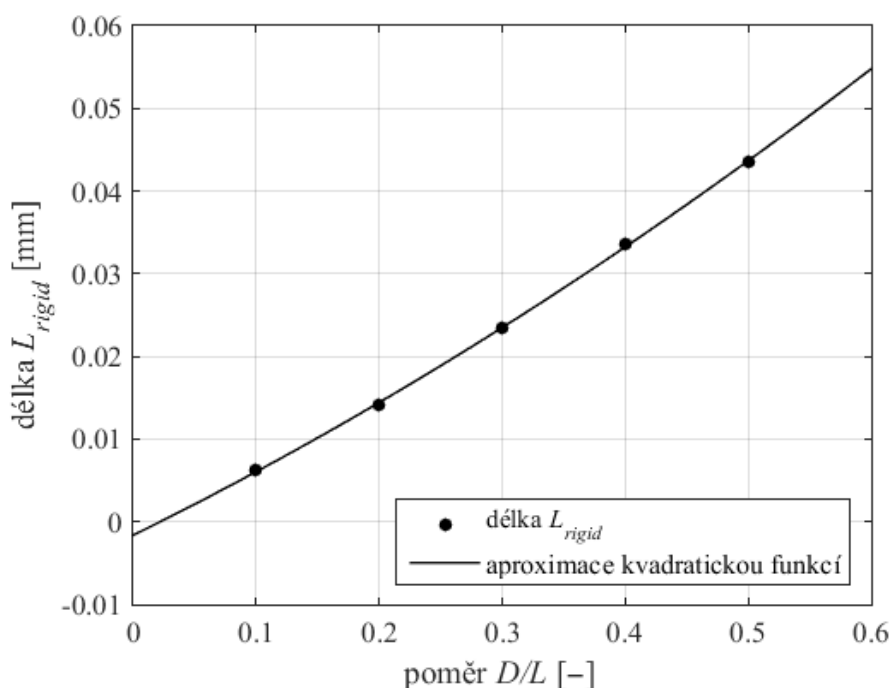
8.2.2 SROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA TYPU PRVKŮ DISKRÉTNÍ SÍTĚ MODELU GEOMETRIE PĚNOVÉ STRUKTURY

Mechanické vlastnosti pěnové struktury jsou obecně závislé na charakteru sítě konečných prvků, kterými je diskretizován model geometrie této struktury. Následně bude prezentován vliv typu prvků, kterými byl diskretizován model geometrie pěnové struktury, na Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo. Při vytváření modelu geometrie pěnové struktury byla vždy zachována délka trámečku $L = 0,3$ mm a změnou průměru trámečku D byly získány příslušné varianty poměru D/L . Analýza závislosti elastických konstant byla provedena pro sedm variant poměru D/L , které jsou spolu s konkrétními hodnotami průměru trámečku uvedeny v tabulce 8.2.

Tab. 8.2 Varianty parametru D pro analýzu závislosti mechanických vlastností pěnové struktury na poměru D/L při konstantní délce trámečku $L = 0,3$.

D [mm]	Poměr D/L pro $L = 0,3$ mm						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
D [mm]	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21

V programovém systému ANSYS se uvádí použitelnost poddajného prutového prvku hodnocená pomocí vztahu pro štíhlost tělesa, jehož geometrie má být tímto prvkem diskretizována. Doporučená minimální hodnota štíhlosti tělesa pro diskretizaci prutovým prvkem je uvedena jako 30 [17]. Pro poměr $D/L = 0,5$ byla po dosažení do tohoto vztahu získána hodnota 25,6. Z tohoto důvodu byly v případě modifikované diskretizace prutovými prvky původně hledány délky tuhého prutového prvku L_{rigid} do poměru $D/L = 0,5$. Závislost délky L_{rigid} na poměru D/L je ukázána na obrázku 8.10.



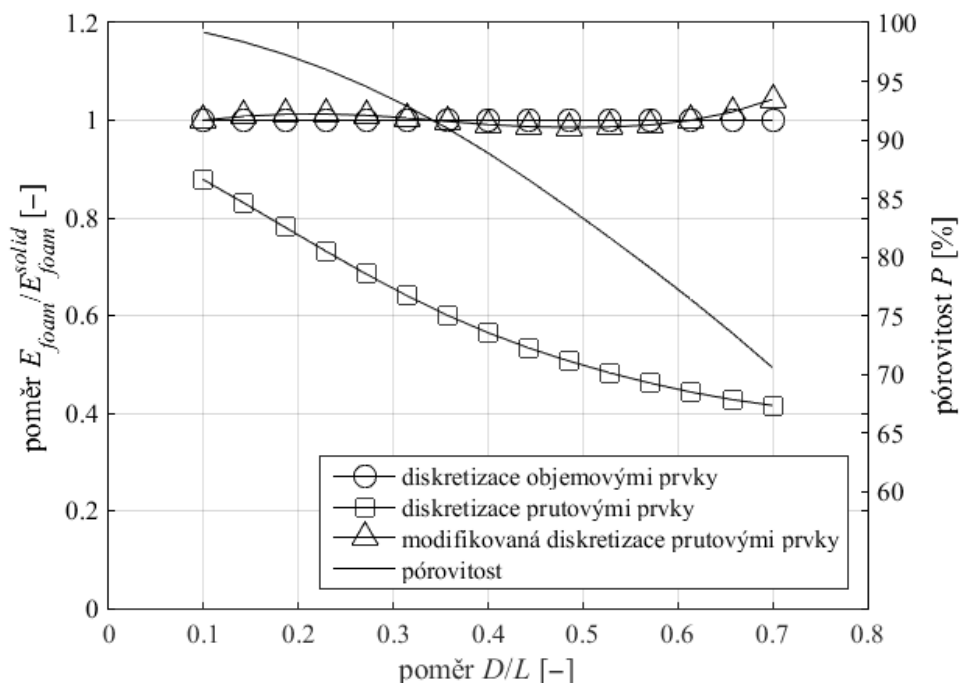
Obr. 8.10 Průběh délky L_{rigid} v závislosti na poměru D/L .

Hodnoty délky L_{rigid} byly v závislosti na poměru D/L aproximovány kvadratickou funkcí, jejíž tvar byl následující:

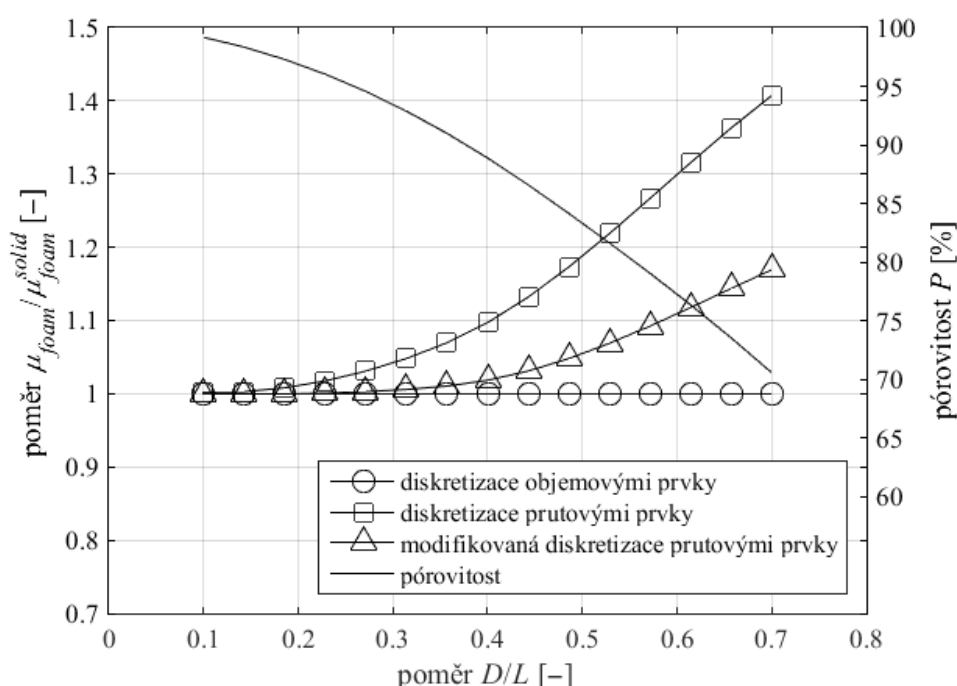
$$L_{rigid} = 0,0343 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2 + 0,0734 \cdot \frac{D}{L} - 0,0016. \quad (10)$$

Na základě vztahu (10) pro aproximaci délky L_{rigid} byly mechanické vlastnosti pěnové struktury porovnány v závislosti na diskretizaci modelu geometrie až do poměru $D/L = 0,7$. Na obrázku 8.11 a obrázku 8.12 je srovnán průběh Youngova modulu pružnosti a Poissonova čísla pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury. Tyto průběhy jsou vztaženy k mechanickým vlastnostem, které byly určeny pomocí modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného objemovými prvky.

V případě nejčtenějšího výskytu elementární buňky s velikostí $H = 0,8$ mm byl průměr průřezu trámečku $D = 0,13$ mm stanoven na základě pórovitosti $P = 85$ %, která byla uvedena v práci [14]. Z tohoto důvodu bude u všech závislostí mechanických vlastností pěnové struktury ve vztahu k druhé svislé ose uveden průběh pórovitosti P v závislosti na poměru D/L . Pórovitost byla v případě jednotlivých variant poměru D/L stanovena inverzním způsobem oproti určení průměru $D = 0,13$ mm.



Obr. 8.11 Závislost poměru $E_{foam}/E_{foam}^{solid}$ pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury na poměru D/L .



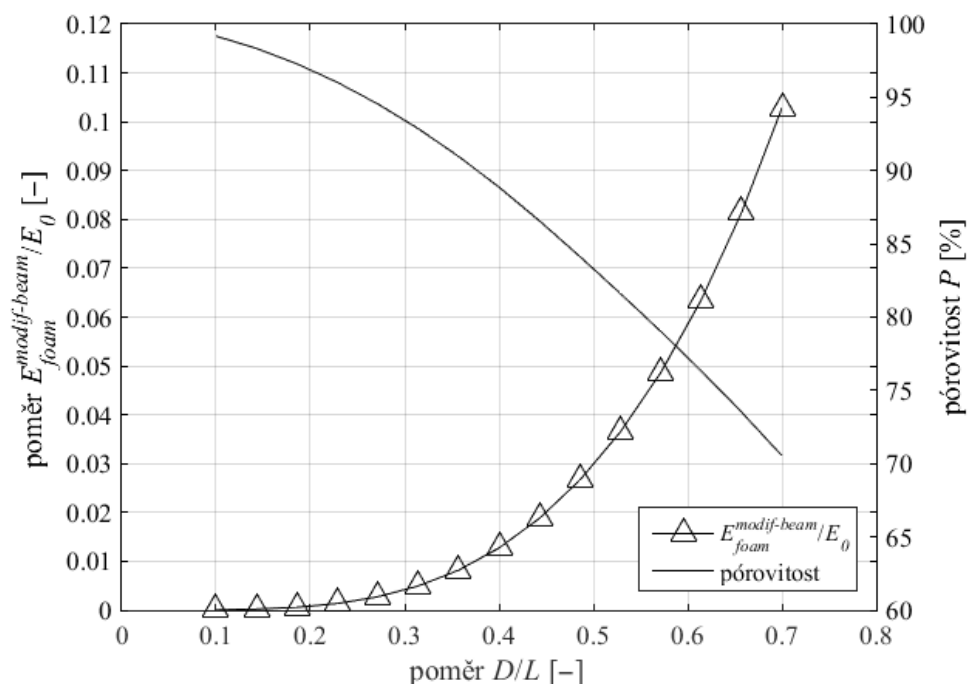
Obr. 8.12 Závislost poměru $\mu_{foam}/\mu_{foam}^{solid}$ pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury na poměru D/L .

Mechanické vlastnosti stanovené pomocí modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky se pro vyšší poměry D/L významně lišily od mechanických vlastností, které byly určeny při diskretizaci objemovými prvky. V případě Youngova modulu pružnosti byl tento rozdíl patrný už od poměru $D/L = 0,1$ a v případě Poissonova čísla přibližně od $D/L = 0,2$. Příčinou bylo podstatně poddajnější chování modelu geometrie diskretizovaného prutovými prvky jak v podélném, tak v příčném směru.

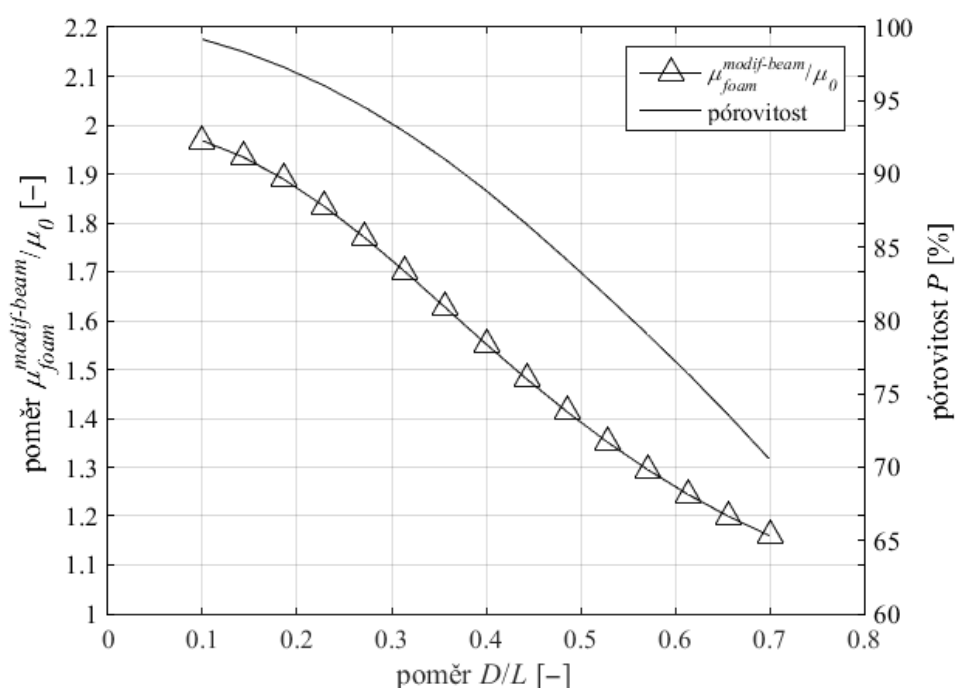
Zahrnutím strukturního zpevnění v oblasti sbíhání trámečků, tzn. v případě kombinované diskretizace tuhým a poddajným prutovým prvkem, se podařilo dobře postihnout deformační odezvu pěnové struktury diskretizované objemovými prvky. Z tohoto důvodu pak bylo docíleno dobré shody v případě elastických konstant. Youngův modul pružnosti se začal významněji odlišovat až při poměru $D/L = 0,6$. V případě Poissonova čísla bylo docíleno shody přibližně do poměru $D/L = 0,4$.

8.2.3 PRŮBĚH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU D/L

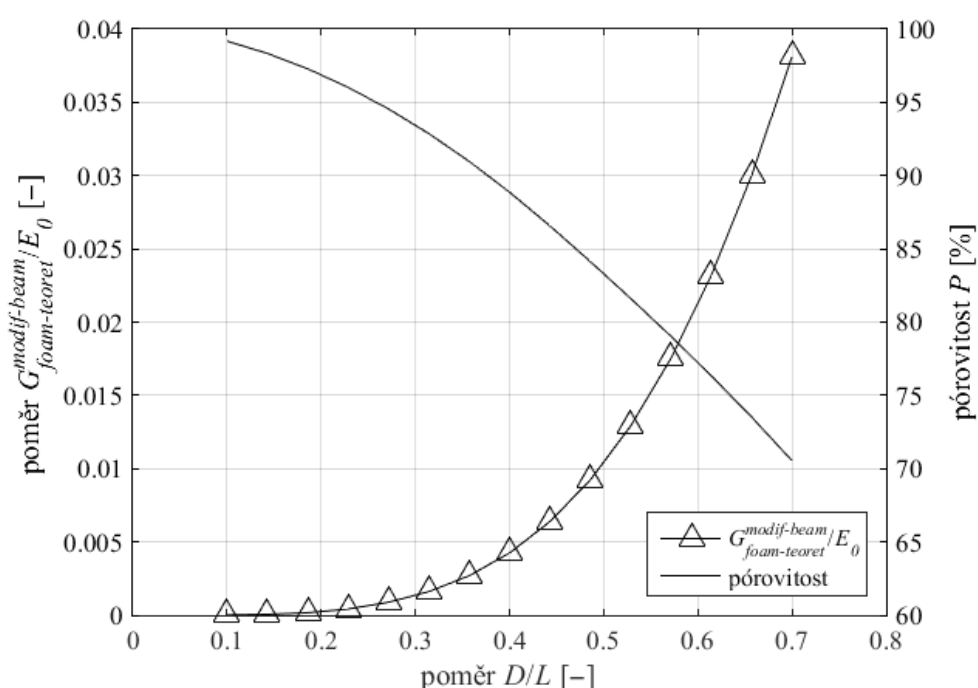
V této kapitole budou prezentovány elastické konstanty, které byly stanoveny pomocí modelu geometrie pěnové struktury s modifikovanou diskretizací prutovými prvky. Na základě tohoto modelu geometrie pěnové struktury bylo především možné stanovit modul pružnosti ve smyku, u kterého bylo nutné provést analýzu vlivu velikosti modelu geometrie pro jednotlivé poměry D/L . Na obrázku 8.13, 8.14 a 8.15 je postupně ukázána závislost Youngova modulu pružnosti, Poissonova čísla a modulu pružnosti ve smyku na poměru D/L . Elastické konstanty byly normalizovány na Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo hutného keramického materiálu.



Obr. 8.13 Průběh normalizovaného Youngova modulu pružnosti $E_{foam}^{modif-beam}/E_0$ v závislosti na poměru D/L .



Obr. 8.14 Průběh normalizovaného Poissonova čísla $\mu_{foam}^{modif-beam}/\mu_0$ v závislosti na poměru D/L .



Obr. 8.15 Průběh normalizovaného modulu pružnosti ve smyku $G_{foam-teoret}^{modif-beam}/E_0$ v závislosti na poměru D/L .

Youngův modul pružnosti a modul pružnosti ve smyku vykazovaly podobný charakter závislosti na poměru D/L . Youngův modul pružnosti se pohyboval v intervalu 4,1–9249 MPa a ke strmému nárůstu jeho hodnot došlo přibližně při pórovitosti pěnové struktury 90 %. Stanovené hodnoty modulu pružnosti ve smyku spadaly do intervalu 1,3–3430 MPa

a k výraznému nárůstu jeho hodnot došlo ve stejné oblasti pórovitosti jako u Youngova modulu pružnosti. V případě Poissonova čísla se pěnová struktura v oblasti vysokých pórovitostí chovala jako téměř nestlačitelná, naopak nejnižší hodnoty 0,29 bylo docíleno pro poměr $D/L = 0,7$. Nutno podotknout, že v této oblasti poměru D/L se Poissonovo číslo významněji lišilo od této elastické konstanty stanovené v případě diskretizace modelu geometrie pěnové struktury objemovými prvky.

V případě velikosti elementární buňky $H = 0,8$ mm a pórovitosti pěnové struktury $P = 85$ % byly pomocí výpočtového modelování stanoveny následující elastické konstanty pěnové struktury:

$$E_{foam}^{modif-beam} = 1,97 \text{ GPa}; \mu_{foam}^{modif-beam} = 0,35; G_{foam-teoret}^{modif-beam} = 0,67 \text{ GPa}.$$

8.3 EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KERAMICKÉ PĚNOVÉ STRUKTURY [14]

V disertační práci [14] jsou uvedeny experimentálně stanovené mechanické vlastnosti keramické pěnové struktury Vukopor®A se střední velikostí pórů 0,8 mm a s pórovitostí 85 %. V případě tohoto typu materiálu je práce zaměřena na vyhodnocení pevnosti v tahu, pevnosti v tlaku, Youngova modulu pružnosti a lomové houževnatosti pro vzorky s centrální trhlinou. Ke stanovení mechanických vlastností keramické pěny byla použita data, která byla získána na základě zkoušky tlakem a zkoušky tahem. V práci jsou uvedena specifika zkušebních strojů, jejich popis a bližší informace z průběhu zkoušek jako je rychlost zatěžování apod. Youngův modul pružnosti byl určen na základě dat z tahové zkoušky a pomocí impulsní excitační metody. Tahová zkouška byla provedena pro více vzorků keramické pěny a obdržená data byla statisticky zpracována. Hodnoty Youngova modulu pružnosti pak byly prezentovány jako střední hodnoty s příslušnou směrodatnou odchylkou.

Impulsní excitační metoda se využívá pro vyhodnocení elastických vlastností materiálu nedestruktivní cestou. Na základě této metody je možné určit Youngův modul pružnosti, Poissonovo číslo a modul pružnosti ve smyku. Principem metody je stanovení spektra rezonančních frekvencí zkušební vzorku, na kterém byl vybuzen slabý pulz. Po krátké periodě přechodového děje začne vzorek kmitat na vlastních frekvencích, které souvisejí s hmotností vzorku, jeho rozměry a elastickými vlastnostmi. Na základě těchto frekvencí se následně stanovují elastické konstanty. [18]

Hodnoty Youngova modulu pružnosti byly pomocí excitační metody určeny na základě deseti měření, které byly provedeny na přístroji Grindosonic. V případě keramického pěnového materiálu Vukopor®A se střední velikostí pórů 0,8 mm a s pórovitostí 85 % byla stanovena střední hodnota Youngova modulu pružnosti 1,56 GPa. [14]

ZÁVĚR

Diplomová je zaměřena na tvorbu výpočtového modelu keramické pěnové struktury s otevřenou pórovitostí a stanovení mechanických vlastností této struktury pomocí výpočtového modelování. Při tvorbě výpočtového modelu se v práci vycházelo z experimentálně naměřených dat uvedených v disertační práci [14], konkrétně ze střední velikosti pórů 0,8 mm, pórovitosti pěnového materiálu 85 % a z mechanických vlastností hutného keramického materiálu.

Model geometrie pěnové struktury byl tvořen na základě prostorového kopírování elementární buňky, jejíž model geometrie vycházel z geometrie Kelvinovy buňky. Model geometrie pěnové struktury byl diskretizován dvěma typy konečných prvků – objemovými prvky a prutovými prvky. Při analýze deformační odezvy pěnové struktury na úrovni substruktury elementární buňky bylo zjištěno, že trámečky diskretizované prutovými prvky vykazují poddajnější chování oproti diskretizaci prvky objemovými. Příčinou bylo vyztužení trámečku substruktury elementární buňky diskretizované objemovými prvky v blízkém δ -okolí uzlového bodu, kde se trámečky stýkaly. Následně byla provedena modifikace sítě prutových prvků, která spočívala v zahrnutí tuhého prutového prvku v oblasti δ -okolí. Při srovnání průběhu deformace trámečku podél střednice na úrovni substruktury elementární buňky v případě diskretizace objemovými prvky a při kombinaci tuhého a poddajného prutového prvku se podařilo docílit prakticky totožné shody. Model geometrie pěnové struktury s modifikovanou diskretizací prutovými prvky pak obsahoval významně méně uzlů, resp. stupňů volnosti, ve srovnání s diskretizací objemovými prvky.

Mechanické vlastnosti pěnové struktury byly určovány na základě dvou typů namáhání. V případě namáhání tahem/tlakem byl stanoven Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo a při namáhání smykem byl určen modul pružnosti ve smyku. S ohledem na způsob namáhání byly na model geometrie pěnové struktury aplikovány odpovídající okrajové podmínky. Efektivní elastické konstanty byly určovány na základě vztahů, do nichž vstupovala deformační odezva modelu geometrie pěnové struktury a její efektivní rozměry. V případě namáhání tahem/tlakem bylo zjištěno, že Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo nezávisely na velikosti modelu geometrie pěnové struktury. V případě namáhání smykem byl analyzován vliv okrajových podmínek a volných povrchů modelu geometrie pěnové struktury na modul pružnosti ve smyku. Při aplikaci periodických okrajových podmínek na model geometrie pěnové struktury bylo docíleno eliminace vlivu volných povrchů pěnové struktury. Vliv okrajových podmínek na modul pružnosti pěnové struktury tak byl analyzován pouze na jednom sloupci elementárních buněk, což významným způsobem snížilo časovou náročnost výpočtů.

Analýza mechanických vlastností pěnové struktury byla provedena v závislosti na charakteristických rozměrech elementární buňky, tzn. na průměru trámečku D a jeho délce L . S ohledem na skutečnost, že mechanické vlastnosti nezávisely na parametrech D a L při zachování jejich poměru, byly elastické konstanty pěnové struktury hledány pouze v závislosti na poměru D/L , resp. na pórovitosti pěnového materiálu P . Pro případ modifikované diskretizace modelu geometrie prutovými prvky byly stanoveny délky tuhého prutového prvku L_{rigid} příslušící jednotlivým poměrům D/L a jejich průběh byl aproximován kvadratickou funkcí. Nejprve byl analyzován vliv způsobu diskretizace modelu geometrie pěnové struktury na Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo. Výsledné hodnoty elastických konstant pěnové struktury byly prezentovány ve vztahu k mechanickým vlastnostem stanoveným pomocí modelu geometrie pěnové struktury, který byl diskretizován objemovými prvky. Elastické konstanty stanovené na základě diskretizace modelu geometrie pěnové struktury prutovými prvky se výrazně lišily ve srovnání s případem diskretizace

objemovými prvky. Při diskretizaci prutovými prvky model geometrie pěnové struktury vykazoval významně poddajnější chování. Kombinací diskretizace tuhými a poddajnými prutovými prvky se v případě Youngova modulu pružnosti podařilo dosáhnout dobré shody až do poměru $D/L = 0,6$. V případě Poissonova čísla bylo shody dosaženo přibližně do poměru $D/L = 0,4$. Nepřesnost mohla být způsobena tím, že při vyšších poměrech D/L naráží použitelnost prutového prvku na své hranice. Dále pak byly elastické konstanty stanovené při modifikované diskretizaci prutovými prvky ovlivněny aproximací délky tuhého prutového prvku L_{rigid} kvadratickou funkcí (10). V závěru práce byla provedena analýza průběhu elastických konstant v závislosti na poměru D/L pro modifikovanou diskretizaci modelu geometrie pěnové struktury prutovými prvky. V případě velikosti elementární buňky $H = 0,8$ mm a pórovitosti pěnové struktury $P = 85$ % byla pomocí výpočtového modelování stanovena hodnota Youngova modulu pružnosti 1,97 GPa. Na základě experimentálních měření uvedených v práci [14] byla v případě keramického pěnového materiálu s odpovídajícím charakterem struktury stanovena hodnota 1,56 GPa. Rozdíl byl způsoben idealizací struktury pěnového materiálu při vytváření jeho modelu geometrie. Dalším důvodem nadhodnocení Youngova modulu pružnosti byla přítomnost strukturních vad, které reálný keramický pěnový materiál obsahuje – při výpočtovém modelování strukturní vady nebyly uvažovány.

Nezanedbatelný vliv na elastické konstanty pěnové struktury určené pomocí výpočtového modelování mělo také neuvažování stochastického charakteru vlastností prvků struktury objektu uvedených v kapitole Systém podstatných veličin. V návrhu dále by měla být provedena analýza vlivu stochastického charakteru podstatných strukturních vlastností na mechanické vlastnosti pěnové struktury, a to s ohledem na velikost intervalů a charakter statistického rozdělení pravděpodobnosti.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular solids: structure and properties*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 510 s. ISBN 0-521-49911-9.
- [2] STUART, André R., Urs T. GONZENBACH, Elena TERVOORT a Ludwig J. GAUCKLER. Processing routes to macroporous ceramics: a review. *Journal of the American Ceramic Society*. 2006, vol. 89, no. 6, s. 1771-1789. ISSN 1551-291.
- [3] BREZNY, Rasto a David J. GREEN. Mechanical behavior of cellular ceramics. In: Michael SWAIN. *Materials science and technology: a comprehensive treatment*. Structure and properties of ceramics. Vol. 11. Weinheim: Wiley-WCH, 1993, s. 463-516. ISBN 978-3527268245.
- [4] BINNER, Jon. Ceramics foams. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 33-56. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [5] RICE, Roy. Mechanical properties. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 291-312. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [6] BREZNY, Rasto a David J. GREEN. Fracture Behavior of Open-Cell Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 1989, vol. 72, no. 7, s. 1145-1152. ISSN 1551-2916.
- [7] ASHBY, Michael F. Cellular solids – Scaling of properties. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 3-17. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [8] MELLO INNOCENTINI, Murilo Daniel de, Pilar SEPULVEDA a Fernando dos SANTOS ORTEGA. Permeability. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 313-341. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [9] FEND, Thomas, Dimosthenis TRIMIS, Robert PITZ-PAAL, Bernhard HOFFSCHMIDT. Thermal properties. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 342-360. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [10] MARTIN, Hans-Peter a Joerg ADLER. Electrical properties. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Wiley-WCH, 2005, s. 361-380. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [11] BERTOLLA, Luca, Ivo DLOUHÝ a Aldo R. BOCCACCINI. Preparation and characterization of Bioglass®-based scaffolds reinforced by poly(vinyl alcohol)/microfibrillated cellulose composite coating. *Journal of European Ceramic Society*. 2014, vol. 34, s. 3379-3387. ISSN 0955-2219.

- [12] FEND, Thomas, Robert PITZ-PAAL, Bernhard HOFFSCHMIDT a Oliver REUTTER. Solar radiation conversion. In: Michael SCHEFFER a Paolo COLOMBO. *Cellular ceramics*. Weinheim: Willey-WCH, 2005, s. 523-546. ISBN 978-3-527-31320-4.
- [13] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky. Hledání souvislostí. Učební texty I*. Brno: CERM, VUTIUM, 2007. 735 s. ISBN 978-80-7204-555-6.
- [14] ŘEHOŘEK, Lukáš. *Mechanická odezva pěnových keramických materiálů*. Brno, 2012. 159 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ivo DLOUHÝ.
- [15] MPC184-LINK/BEAM. *ANSYS® Help Viewer 17.2.0* [software]. ANSYS, Inc. [přístup 16. dubna 2017].
- [16] JANÍČEK, Přemysl, Emanuel ONDRÁČEK, Jan VRBKA. *Mechanika těles: pružnost a pevnost I*. Brno: Nakladatelství VUT, 1992. 287 s. ISBN 80-214-0468-X.
- [17] BEAM189. *ANSYS® Help Viewer 17.2.0* [software]. ANSYS, Inc. [přístup 16. dubna 2017].
- [18] ROEBBEN, Gert, BOLLEN, BREBELS, Jan van HUMBEECK a Omer van der BIEST. Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments*. 1997, vol 68, s. 4511-4515. ISSN 1089-7623.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C_1	[-]	konstanta úměrnosti ve vztahu pro relativní hustotu
C_3	[-]	konstanta úměrnosti ve vztahu pro normalizovaný Youngův modul pružnosti
E_0	[MPa]	Youngův modul pružnosti hutného keramického materiálu
E_{foam}	[MPa]	obecné označení Youngova modulu pružnosti pěnové struktury
E_{foam}^{beam}	[MPa]	Youngův modul pružnosti pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován prutovými prvky
$E_{foam}^{modif-beam}$	[MPa]	Youngův modul pružnosti pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován kombinací tuhého a poddajného prutového prvku
E_{foam}^{solid}	[MPa]	Youngův modul pružnosti pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován objemovými prvky
G_{foam}	[MPa]	obecné označení modulu pružnosti ve smyku pěnové struktury
$G_{foam}^{modif-beam}$	[MPa]	modul pružnosti ve smyku pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován kombinací tuhého a poddajného prutového prvku
$G_{foam-teoret}^{modif-beam}$	[MPa]	modul pružnosti ve smyku pěnové struktury bez vlivu okrajových podmínek a volných povrchů
L_{rigid}	[mm]	délka tuhé prutového prvku
S_s, V_s, T_s	[-]	počet elementárních buněk na šířku, výšku a tloušťku modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem
S_t, V_t, T_t	[-]	počet elementárních buněk na šířku, výšku a tloušťku modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem
V_c	[mm ³]	objem krychle obklopující elementární buňku
V_{tr}	[mm ³]	objem trámečků elementární buňky
γ_{xy}	[-]	úhlové přetvoření
ε_x	[-]	délkové přetvoření v příčném směru
ε_y	[-]	délkové přetvoření v podélném směru
μ_0	[-]	Poissonovo číslo hutného keramického materiálu
μ_{foam}	[-]	obecné označení Poissonova čísla pěnové struktury
μ_{foam}^{beam}	[-]	Poissonovo číslo pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován prutovými prvky
$\mu_{foam}^{modif-beam}$	[-]	Poissonovo číslo pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován kombinací tuhého a poddajného prutového prvku
μ_{foam}^{solid}	[-]	Poissonovo číslo pěnové struktury, jejíž model geometrie byl diskretizován objemovými prvky
ρ_0	[kg/m ³]	hustota hutného keramického materiálu
σ_y	[MPa]	normálové napětí vztažené k efektivním rozměrům modelu geometrie pěnové struktury
τ_{xy}	[MPa]	smykové napětí vztažené k efektivním rozměrům modelu geometrie pěnové struktury

C	[MPa]	konstanta zahrnující vliv velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání smykem
D	[mm]	průměr kruhovitého průřezu trámečku
F	[N]	zátěžná síla
H	[mm]	velikost elementární buňky
L	[mm]	délka trámečku elementární buňky pěnové struktury s otevřenou pórovitostí
P	[%]	pórovitost keramického pěnového materiálu
n	[–]	exponent ve vztahu pro modelování mechanických vlastností pěnové struktury
t	[mm]	tloušťka trámečku elementární buňky pěnové struktury s otevřenou pórovitostí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1 Mikrostruktura keramického materiálu: a) vláknového, b) celulárního s pravidelnou mřížkou, c) pěnového s otevřenou pórovitostí, d) pěnového s uzavřenou pórovitostí [3].	19
Obr. 4.2 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu replikační metodou [2].	21
Obr. 4.3 Dutina uvnitř trámečku vzniklá po odstranění polymerního templátu [3].	21
Obr. 4.4 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu metodou přímého pění [2].	22
Obr. 4.5 Schéma přípravy keramického pěnového materiálu pomocí metody obětovaného templátu [2].	22
Obr. 4.6 a) Elementární buňka pěnového materiálu s otevřenou pórovitostí podle Gibsona a Asbyho [7] a b) její rozmístění v prostoru spolu s ostatními buňkami [5].	24
Obr. 4.7 Síť elementárních buněk krychlového tvaru s kulovými póry [5].	25
Obr. 4.8 Solární elektrárna využívající keramický pěnový materiál k přeměně tepelné energie na elektrickou [12].	27
Obr. 5.1 Podmnožiny Systému veličin $\Sigma(\Omega)$ [13].	28
Obr. 6.1 Geometrie Kelvinovy buňky.	31
Obr. 6.2 a) Model geometrie elementární buňky vytvořený v programu Inventor a b) diskretizace tohoto modelu objemovými prvky.	32
Obr. 6.3 Diskretizace modelu geometrie elementární buňky prutovými prvky.	33
Obr. 6.4 Substruktura elementárních buněk pěnového materiálu.	33
Obr. 6.5 Model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný a) objemovými a b) prutovými prvky.	34
Obr. 6.6 Znázornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie substruktury elementární buňky vytvořeném v programu Inventor.	34
Obr. 6.7 Antisymetrický tvar deformace trámečku podél jeho střednice.	35
Obr. 6.8 Schéma okrajových podmínek aplikovaných na model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky.	36
Obr. 6.9 Schéma okrajových podmínek aplikovaných na model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný prutovými prvky.	36
Obr. 6.10 Srovnání celkového posuvu podél střednice trámečku pro model geometrie substruktury elementární buňky diskretizovaný objemovými prvky a prutovými prvky.	37
Obr. 6.11 Znázornění části trámečku diskretizované tuhým a poddajným prutovým prvkem.	38
Obr. 6.12 Schéma procesu hledání délky tuhého prutového prvku.	39
Obr. 6.13 Závislost délky tuhého prutového prvku na velikosti objemového prvku modelu geometrie substruktury elementární buňky.	40
Obr. 6.14 Srovnání deformace substruktury elementární buňky diskretizované objemovými prvky s modifikovanou diskretizací prutovými prvky.	40
Obr. 6.15 Srovnání celkového posuvu podél střednice trámečku substruktury elementární buňky diskretizované objemovými prvky s modifikovanou diskretizací prutovými prvky.	41
Obr. 6.16 Znázornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného objemovými prvky.	42
Obr. 6.17 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$ diskretizovaný prutovými prvky.	42
Obr. 6.18 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $4 \times 4 \times 4$ diskretizovaný kombinací tuhého a poddajného prutového prvku.	43
Obr. 6.19 Znázornění využití dvou rovin symetrie modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky.	43
Obr. 6.20 Model geometrie pěnové struktury o velikosti $6 \times 4 \times 1$ diskretizovaný prutovými prvky.	44

Obr. 6.21 Znázornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného objemovými prvky při namáhání tahem/tlakem.	45
Obr. 6.22 Znázornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky při namáhání tahem/tlakem.	45
Obr. 6.23 Znázornění okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $6 \times 4 \times 1$ diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.	46
Obr. 6.24 Znázornění periodických okrajových podmínek modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $1 \times 4 \times 1$ diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.	47
Obr. 7.1 Znázornění deformační odezvy modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného a) objemovými a b) prutovými prvky při namáhání tahem/tlakem.	48
Obr. 7.2 Znázornění deformační odezvy modelu geometrie pěnové struktury diskretizovaného prutovými prvky při namáhání smykem.	49
Obr. 8.1 Závislost Youngova modulu pružnosti E_{foam}^{solid} na velikosti objemového prvku.	51
Obr. 8.2 Závislost Poissonova čísla μ_{foam}^{solid} na velikosti objemového prvku.	52
Obr. 8.3 Závislost Youngova modulu pružnosti $E_{foam}^{modif-beam}$ na velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem.	53
Obr. 8.4 Závislost Poissonova čísla $\mu_{foam}^{modif-beam}$ na velikosti modelu geometrie pěnové struktury při namáhání tahem/tlakem.	53
Obr. 8.5 Průběh modulu pružnosti ve smyku v závislosti na počtu elementárních buněk na šířku modelu geometrie pěnové struktury o velikosti $S_s \times 4 \times 1$	54
Obr. 8.6 Průběh modulu pružnosti ve smyku v závislosti na počtu elementárních buněk na výšku modelu geometrie pěnové struktury s periodickými okrajovými podmínkami.	55
Obr. 8.7 Závislost délky L_{rigid} na průměru trámečku D pro konstantní poměr D/L	57
Obr. 8.8 Srovnání Youngova modulu pružnosti pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury při zachování poměru D/L	58
Obr. 8.9 Porovnání Poissonova čísla pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury při zachování poměru D/L	58
Obr. 8.10 Průběh délky L_{rigid} v závislosti na poměru D/L	59
Obr. 8.11 Závislost poměru $E_{foam}/E_{foam}^{solid}$ pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury na poměru D/L	60
Obr. 8.12 Závislost poměru $\mu_{foam}/\mu_{foam}^{solid}$ pro všechny diskretizace modelu geometrie pěnové struktury na poměru D/L	61
Obr. 8.13 Průběh normalizovaného Youngova modulu pružnosti $E_{foam}^{modif-beam}/E_0$ v závislosti na poměru D/L	62
Obr. 8.14 Průběh normalizovaného Poissonova čísla $\mu_{foam}^{modif-beam}/\mu_0$ v závislosti na poměru D/L	63
Obr. 8.15 Průběh normalizovaného modulu pružnosti ve smyku $G_{foam-teoret}^{modif-beam}/E_0$ v závislosti na poměru D/L	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 7.1 Značení elastických konstant podle typu prvků diskrétní sítě modelu geometrie pěnové struktury.	49
Tab. 8.1 Varianty parametrů D a L pro analýzu mechanických vlastností pěnové struktury při zachování poměru D/L	56
Tab. 8.2 Varianty parametru D pro analýzu závislosti mechanických vlastností pěnové struktury na poměru D/L při konstantní délce trámečku $L = 0,3$	59

SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy na CD:

[Příloha 1]

Elektronická verze diplomové práce.

